



Universidade de Aveiro
2008

Departamento de Engenharia Mecânica

**Tiago Mateus dos
Santos**

**Simulação Computacional do Processo de Micro
Injecção**



Universidade de Aveiro
2008

Departamento de Engenharia Mecânica

**Tiago Mateus dos
Santos**

**Simulação Computacional do Processo de Micro
Injecção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica realizada sob a orientação científica da Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Universidade de Aveiro
2008

Departamento de Engenharia Mecânica

O júri

Presidente

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor António José Vilela Pontes
Departamento de Polímeros, Universidade do Minho

Orientador

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Co-orientador

Prof. Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo
Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico de Leiria



Palavras-chave

Micro tecnologia, micro componente, micro processo, micro injeção, simulação computacional.

Resumo

Como resultado do crescente consumo de micro componentes e sistemas com micro componentes incorporados, a micro injeção de materiais termoplásticos tem vindo a ganhar importância no seio tecnológico e industrial.

Com a elaboração desta dissertação pretende-se desenvolver o conhecimento sobre os micro processos de fabricação, nomeadamente os micro processos de transformação de materiais plásticos, destacando-se o processo de micro injeção.

Na fase experimental, recorrendo ao *software Molflow Plastics Insight®*, procedeu-se à elaboração de simulações computacionais do processo de micro injeção. Através da análise e discussão destas simulações tiram-se conclusões reveladoras das características deste processo. O tipo de análise mais adequado também é alvo de estudo na fase experimental. É utilizado o método de Taguchi como ferramenta de elaboração e análise de planos de experiências.

Nesta dissertação são visíveis as vantagens trazidas por uma relação de simbiose entre o método de Taguchi e a análise computacional.



Keywords

Micro technology, micro component, micro process, micro injection, computacional simulation.

Abstract

As result to the growing consumption of micro components and micro embedded component systems, the micro injection of thermoplastic materials has been gaining importance within the technological and Industrial industries.

The development of this dissertation, aims to develop the knowledge on micro manufacturing processes, including micro-processing procedures of plastic materials, especially the process of micro injection.

The Molflow Plastics Insight® software used during the experimental phase, led to the development of computational simulations of the micro injection processes. Over analysis and discussion of these simulations derived revealing conclusions on the characteristics of this process. The most appropriate type of analysis is also target for study in the experimental phase. The Taguchi method is used as a tool in the elaboration and analysis of experience plans.

In this dissertation, the benefits that are brought by a symbiosis relationship between the Taguchi method and the computational analysis are extremely visible.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Importância das micro tecnologias.....	15
1.2	Estrutura e objectivos da dissertação.....	21
2	ESTADO DA ARTE – MICRO PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	22
2.1	Introdução.....	22
2.2	Fabrico directo.....	23
2.2.1	Processos litográficos – LIGA	23
2.2.1.1	LIGA raio-X	24
2.2.1.2	LIGA UV	26
2.2.1.3	LIGA IB	27
2.2.1.4	LIGA LASER.....	28
2.2.2	Micro estereolitografia.....	28
2.2.3	Foto-polimerização bi-fotónica.....	32
2.2.4	Micro sinterização selectiva por LASER.....	36
2.2.5	Ablação LASER.....	39
2.3	Fabrico indirecto	41
2.3.1	Micro injecção	42
2.3.2	Micro moldação com reacção	42
2.3.3	Micro gravação a quente	43
2.3.4	Micro termoformação	44

3	MICRO INJECCÃO	45
----------	-----------------------------	-----------

3.1	Descrição do processo	45
3.2	Variantes do processo	48
3.2.1	Micro injecção multimaterial	48
3.2.2	Micro injecção/compressão	48
3.2.3	Micro injecção de pós	49
3.3	Equipamentos	49
3.4	Formulação matemática	53
3.4.1	Regime estacionário	54
3.4.2	Regime transiente	57
3.4.2.1	Equações parabólicas	57
3.4.2.2	Equações hiperbólicas	58
3.4.3	Reologia	60
3.4.4	Modelo matemático	62
3.4.4.1	Fase de enchimento	62
3.4.4.2	Fase de compactação	67

4	RESULTADOS	73
----------	-------------------------	-----------

4.1	Estudo comparativo	73
4.2	Estudo computacional	84

5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	96
----------	---	-----------

5.1	Conclusões	96
5.2	Trabalhos futuros	98

LISTA DE ABREVIATURAS

2PP	<i>Two Photon Polymerization</i>
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
CD	<i>Compact Disc</i>
DVD	<i>Digital Video Disc</i>
Fs	Femto-segundo
GL	Gráfica Linear
HPEA	<i>Hyperbranched Polyester Acrylate</i>
IB	<i>Ion Beam</i>
IR	Infra Vermelho
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LBM	<i>Laser Beam Machining</i>
LIGA	<i>Litographie Galvanik Abforming</i>
MEMS	Micro Sistemas Electro-Mecânicos
ORMOCER	<i>Organic Modified Ceramic</i>
PA	Poliamida
PC	Polycarbonato
PIM	<i>Powder Injection Molding</i>

PMMA	Polimetil-Metacrilato
POM	Poliacetal
PP	Polipropileno
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
SL	Estereolitografia
SLS	Sinterização Selectiva por Laser
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação
UV	Ultra Violeta

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Razão de aspecto.....	16
Figura 1.2: Aspectos integrativos entre micro tecnologia, nano-tecnologia e tecnologia convencional.....	19
Figura 1.3: Tendência de mercado para as micro tecnologias.....	20
Figura 2.1: Micro processos de transformação de materiais plásticos	22
Figura 2.2: Evolução da escala dos processos aditivos e subtractivos	23
Figura 2.3: Fases do processo LIGA raio-X.....	24
Figura 2.4: LIGA raio-X com material de suporte positivo	25
Figura 2.5: LIGA raio-X com material de suporte negativo	25
Figura 2.6: Fases do processo LIGA UV	26
Figura 2.7: Micro estereolitografia.....	29
Figura 2.8: Exemplos de aplicações de μ -SL	32
Figura 2.9: Diagrama esquemático do processo de 2PP.....	33
Figura 2.10: Micro aranhas a); micro Vénus num cabelo humano b)	34
Figura 2.11: Esquema 3D Microstructuring System do Laser Zentrum Hannover e.V. (esquerda); fotografia (direita).....	35
Figura 2.12: Processo SLS	36
Figura 2.13: Detalhe de operação da plataforma de processamento	37
Figura 2.14: Componente tridimensional	38
Figura 2.15: Estrutura em hélice dupla para ilustrar a capacidade de construção sem necessidade de suportes	38
Figura 2.16: 3D-MICROMAC AG: PS-1064-1	39
Figura 2.17: Matsuura: LUMEX 25 C.....	39
Figura 2.18: Processamento por ablação LASER	40
Figura 2.19: Fases do processo de micro gravação a quente.....	43
Figura 2.20: Fases do processo de micro termoformação	44
Figura 3.1: Gráfico de variação de temperatura do molde	47
Figura 3.2: Battenfeld microsystem 50 – unidade de injecção.....	51
Figura 3.3: Sumitomo – sistema SK.....	52
Figura 3.4: Domínio de um problema bidimensional.....	54

Figura 3.5: Discretização de elementos finitos do problema modelo	55
Figura 3.6: Classificação de fluidos	61
Figura 3.7: Condições de fronteira em simulação de enchimento	65
Figura 3.8: Condições de fronteira em simulação de pressurização	68
Figura 4.1: a) vista 3D da peça; b) dimensões da peça utilizada no estudo comparativo ...	73
Figura 4.2: Força de fecho da análise nº 8 em POM.....	76
Figura 4.3: Pressão de enchimento da análise nº 5 em PP	77
Figura 4.4: Pressão na comutação da análise nº 8 em PA.....	78
Figura 4.5: Gráfica linear para variação de pressão em POM (estudo comparativo)	81
Figura 4.6: Gráfica linear para variação de pressão em PP (estudo comparativo).....	81
Figura 4.7: Gráfica linear para variação de pressão em PA (estudo comparativo).....	81
Figura 4.8: Pressão de injecção com a combinação favorável em POM (estudo comparativo).....	83
Figura 4.9: Pressão de injecção com a combinação favorável em PP (estudo comparativo)	83
Figura 4.10: Pressão de injecção com a combinação favorável em PA (estudo comparativo)	83
Figura 4.11: a) vista 3D da peça; b) dimensões da peça utilizada no estudo computacional	84
Figura 4.12: Gráfica linear para variação de pressão em POM (estudo computacional)....	87
Figura 4.13: Gráfica linear para variação de pressão em PP (estudo computacional)	88
Figura 4.14: Gráfica linear para variação de pressão em PA (estudo computacional)	88
Figura 4.15: Pressão para a combinação favorável em POM (estudo computacional).....	89
Figura 4.16: Pressão para a combinação favorável em POM (estudo computacional).....	89
Figura 4.17: Pressão para a combinação favorável em POM (estudo computacional).....	89
Figura 4.18: Gráfica linear para variação de pressão em PC (estudo computacional).....	91
Figura 4.19: Pressão para a combinação favorável em PC (estudo computacional).....	91
Figura 4.20: Relação tempo de injecção Vs pressão	93
Figura 4.21: Pressão obtida em cada modelo	95
Figura 4.22: Variação da pressão obtida dos modelos <i>Stokes</i> simplificado e <i>Navier-Stokes</i> para o modelo de <i>Stokes</i>	95
Figura 5.1: Esquema do escoamento com efeito de escorregamento.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Primeiros sistemas de fabricação com superfície constrangida.....	30
Tabela 2.2: Características dos primeiros sistemas de fabricação com superfície livre	31
Tabela 3.1: Características de máquinas de micro injecção	50
Tabela 4.1: Matriz L_9 de Taguchi	74
Tabela 4.2: Características dos materiais utilizados no estudo comparativo	74
Tabela 4.3: Matriz de experiências.....	75
Tabela 4.4: Características do material definido para o molde	76
Tabela 4.5: Matriz de Taguchi com os resultados para POM (estudo comparativo)	77
Tabela 4.6: Matriz de Taguchi com os resultados para PP (estudo comparativo).....	78
Tabela 4.7: Matriz de Taguchi com os resultados para PA (estudo comparativo).....	79
Tabela 4.8: Média de cada nível por parâmetro para POM (estudo comparativo).....	79
Tabela 4.9: Média de cada nível por parâmetro para PP (estudo comparativo).....	80
Tabela 4.10: Média de cada nível por parâmetro para PA (estudo comparativo)	80
Tabela 4.11: Combinação favorável, previsão e resultados (estudo comparativo)	82
Tabela 4.12: Matriz de Taguchi com os resultados para POM (estudo computacional).....	85
Tabela 4.13: Matriz de Taguchi com os resultados para PP (estudo computacional)	85
Tabela 4.14: Matriz de Taguchi com os resultados para PA (estudo computacional)	86
Tabela 4.15: Média de cada nível por parâmetro para POM (estudo computacional)	86
Tabela 4.16: Média de cada nível por parâmetro para PP (estudo computacional)	87
Tabela 4.17: Média de cada nível por parâmetro para PA (estudo computacional).....	87
Tabela 4.18: Combinação favorável, previsão e resultados para POM, PP e PA (estudo computacional)	88
Tabela 4.19: Características do PC utilizado no estudo computacional.....	90
Tabela 4.20: Matriz de Taguchi com os resultados para PC (estudo computacional).....	90
Tabela 4.21: Média de cada nível por parâmetro para PC (estudo computacional).....	91
Tabela 4.22: Combinação favorável, previsão e resultados para PC (estudo computacional)	92
Tabela 4.23: Valores fixos de entrada	92
Tabela 4.24: Valores de pressão obtidos	92
Tabela 4.25: Valores mínimos para temperatura de molde	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância das micro tecnologias

As micro e as nano-tecnologias são áreas da ciência e da indústria que se encontram numa fase emergente de desenvolvimento. Os semi-condutores são uma tecnologia com elevado grau de maturidade devido aos grandes desenvolvimentos que esta tecnologia sofreu nas décadas de 80 e 90 e têm uma vasta gama de aplicações na electrónica e na informática. Estes sistemas, na década de 80, foram alvo de grande desenvolvimento e actualmente têm aplicações em várias áreas como o processamento de dados, as telecomunicações e a instrumentação médica.

Os primeiros desenvolvimentos das micro tecnologias ocorreram na década de 60 com o aparecimento da micro electrónica, contudo, os primeiros dispositivos foram alcançados na década de 80. A miniaturização de componentes e sistemas incorporados nos mais diversos ramos da indústria, aplicações médicas e domésticas tornaram-se uma realidade nas duas últimas décadas. A evolução constante de técnicas de micro fabricação e de materiais tem criado novas aplicações, mais complexas, mais eficazes e mais ambiciosas no que toca à visão do futuro.

Apesar de haver várias definições de micro componente e de micro estrutura tem sido difícil estabelecer limites superiores ou inferiores devido à diversidade de processos de fabricação de micro componente, o que implica que a definição de micro componente não dependa apenas das suas dimensões mas também da tecnologia utilizada.

Segundo Evans *et al* (2001), os termos micro componente ou micro estrutura designam um componente ou uma estrutura com dimensões sub-milimétricas, ou seja, componentes ou estruturas cujas dimensões se situam na casa das centenas de micrómetros e com tolerâncias na vizinhança do micrómetro ou mesmo abaixo deste valor.

Kukla *et al* (1998) aborda a definição de micro componente por várias perspectivas:

- Massa do componente na ordem dos miligramas;
- O componente tem dimensões convencionais, mas com detalhes na casa dos micrómetros;
- O componente tem dimensões convencionais mas com tolerâncias à escala micrométrica.

A razão de aspecto (*aspect ratio*) é um factor muito importante no fabrico de micro componentes porque se pode tornar num factor limitativo de um determinado componente ou processo. A razão de aspecto consiste na razão entre a altura ou a profundidade de um determinado componente e a menor dimensão lateral (Figura 1.1), que neste caso seria $\frac{h}{l}$.

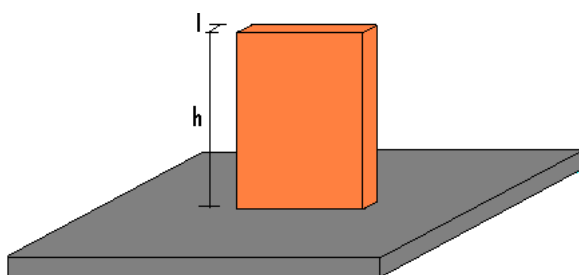


Figura 1.1: Razão de aspecto

Este factor é um enorme desafio colocado às técnicas de micro fabricação, em particular aos processos de produção em massa de micro componentes. No que se refere especificamente às técnicas de micro fabricação é deveras importante considerar as limitações quanto à razão de aspecto a obter.

As micro tecnologias envolvem um conjunto alargado de processos associados ao fabrico de componentes e sistemas com dimensões muito reduzidas, com tolerâncias dimensionais e de forma micro e nanométricas. Estes micro sistemas têm crescente importância no âmbito de aplicações médicas, dispositivos electrónicos e óptico-electrónicos, pelo que, na grande maioria dos casos, correspondem a soluções multi-material, combinando frequentemente elementos metálicos ou cerâmicos com componentes plásticos. A migração para estas áreas aplicacionais de elevado valor acrescentado exige uma mudança de mentalidade dos actores industriais que terá necessariamente de ser baseada no

conhecimento. O sucesso comercial destes micro sistemas depende fortemente da capacidade da indústria em se conseguir adaptar e poder assim produzir em larga escala micro componentes e desenvolver as necessárias técnicas de montagem. De facto, os processos associados à concepção de micro componentes e micro ferramentas, assim como as subsequentes operações de montagem exigem um domínio integral das respectivas soluções tecnológicas (Vasco, 2006).

A concepção e a produção deste tipo de dispositivos exigem (*Idem*):

- Metodologias específicas de desenvolvimento de produto com regras de projecto próprias;
- Metodologias específicas para o projecto de ferramentas;
- Novas tecnologias de micro replicação para materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos;
- Soluções específicas de embalagem adequadas a garantirem o subsequente manuseamento funcional dos componentes produzidos;
- Técnicas de inspecção para controlo e validação do processo como a caracterização dimensional de dispositivos baseada em tecnologias ópticas.

Os domínios de aplicação das micro tecnologias são bem conhecidos, sendo empregues em diversos sectores de actividade e em micro sistemas que tiram partido das valências proporcionadas por cada uma destas tecnologias, tornando-as transversais na sua aplicação. Os principais domínios das micro tecnologias são:

- Micro óptica;
- Micro fluídica;
- Micro electrónica;
- Micro mecânica.

Os sectores de actividade onde estas micro tecnologias já se encontram são muito variados. A miniaturização de componentes e sistemas tem desempenhado um papel importante no desenvolvimento tecnológico dos últimos anos.

As aplicações das micro tecnologias são muito diversas e distribuem-se por diversos sectores de actividade que rodeiam o nosso dia-a-dia. Os principais eixos impulsionadores do desenvolvimento de novos micro sistemas são, essencialmente:

- Aeroespacial;
- Energia e ambiente;
- Medicina;
- TICs (Tecnologias da Informação e Comunicação);
- Domótica e robótica industrial;
- Automóvel e transportes;
- Electrónica de consumo e conforto especial.

A nano-tecnologia é uma nova técnica relativa ao estudo e ao controlo das propriedades da matéria à escala nanométrica: um nanómetro (1×10^{-9} m) é o comprimento de uma pequena molécula. A esse nível, a matéria exhibe propriedades diferentes das registadas à escala micrométrica. O desvanecimento das fronteiras entre as áreas técnico-científicas estabelecidas resulta no carácter fortemente interdisciplinar associado às nano-tecnologias. Estas tecnologias podem ser consideradas revolucionárias quanto ao seu possível impacto no domínio da produção industrial. Elas oferecem soluções possíveis para muitos problemas actuais, através do desenvolvimento de novos materiais e sistemas, menores, mais rápidos e eficazes, abrindo deste modo novas oportunidades para criar riqueza e emprego. Prevê-se também que as nano-tecnologias dêem alguns contributos essenciais para a resolução de problemas do mundo e do ambiente mediante a criação de produtos e processos mais adaptados à utilização final, possibilitando a economia de recursos e a redução de resíduos e emissões (Comissão Europeia, 2004). Neste momento registam-se enormes progressos na corrida mundial às nano-tecnologias, fazendo com que estas deixem de ser vistas apenas como tecnologias do futuro mas sim do presente com um longo caminho ainda a percorrer.

A Figura 1.2 expõe a forma correcta que a tecnologia deve ter, numa perspectiva colaborativa entre as várias escalas, isto é, a forma como a indústria acrescenta valor aos seus produtos e à sua tecnologia se conseguir executar uma convergência entre as Macro, Micro e Nano-tecnologias.

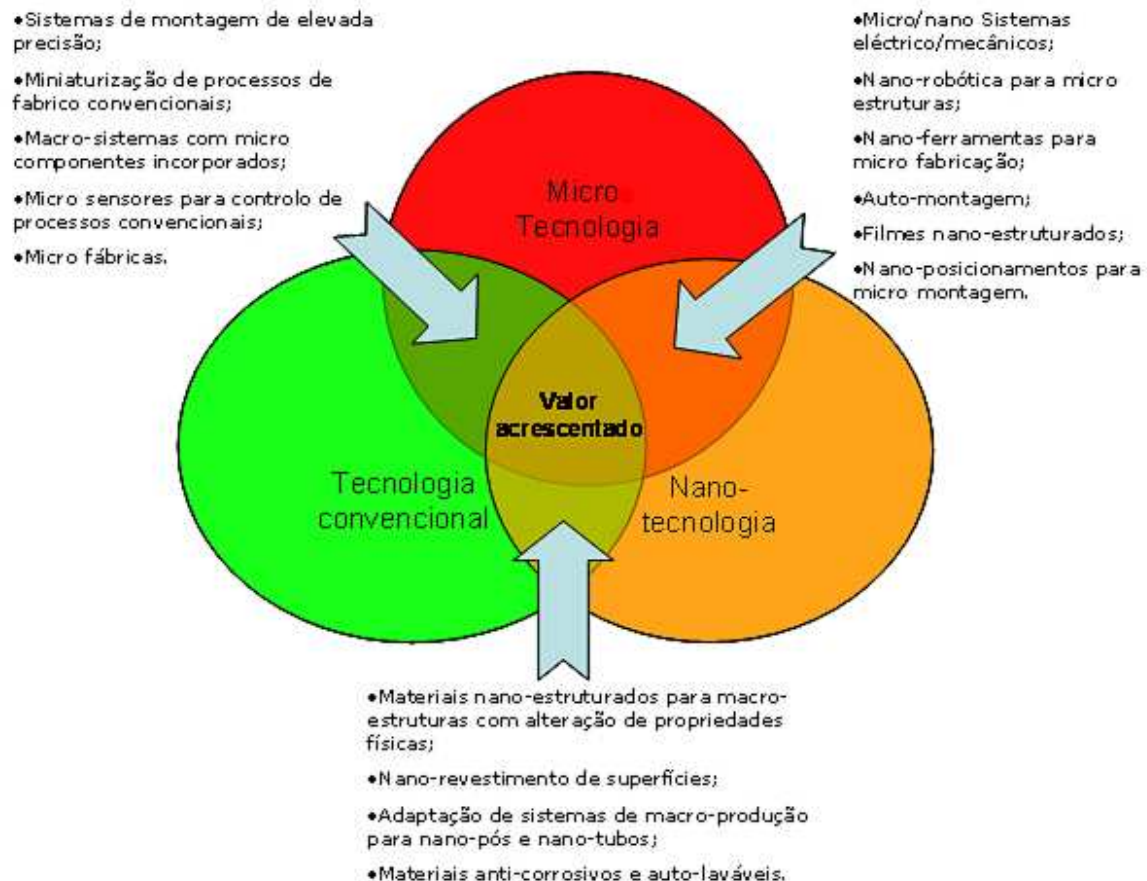


Figura 1.2: Aspectos integrativos entre micro tecnologia, nano-tecnologia e tecnologia convencional (Almansa *et al*, 2006)

A intersecção de vários domínios constitui portanto uma mais-valia do ponto de vista tecnológico. Desta forma é possível o desenvolvimento de tecnologias ou produtos inovadores. De uma forma geral, o cruzamento das macro com as nano-tecnologias levou ao desenvolvimento de materiais com características superficiais muito particulares, como por exemplo os materiais auto-laváveis. Da relação entre as micro e a nano-tecnologias é visível a sua grande aplicação na área da electrónica e robótica, enquanto da interacção entre as micro e as macro-tecnologias resulta a miniaturização das tecnologias e componentes convencionais.

No que se refere à quantificação do significado que estes sectores de actividade possuem no contexto geral das micro tecnologias, a Figura 1.3 ilustra a tendência evolutiva do consumo de micro componentes e micro sistemas no espaço temporal de 5 anos, desde 2004 a 2009. É notória a importância do consumo de micro tecnologia pelas TICs embora se denote uma tendência decrescente devido a alguma migração para o domínio da electrónica de consumo, a qual exhibe o crescimento mais acentuado de todos os sectores analisados.

Na figura apresentada não se deve analisar isoladamente o peso relativo das actividades, mas considerar também o aumento do consumo de micro tecnologia para mais do dobro. Por exemplo, o sector automóvel vê a sua parcela percentual reduzir-se de 11% em 2004 para 8% em 2009. Em termos financeiros, esta parcela passa de 1,32 milhões US\$ para 2 milhões US\$, o que se traduz num crescimento superior a 50%.

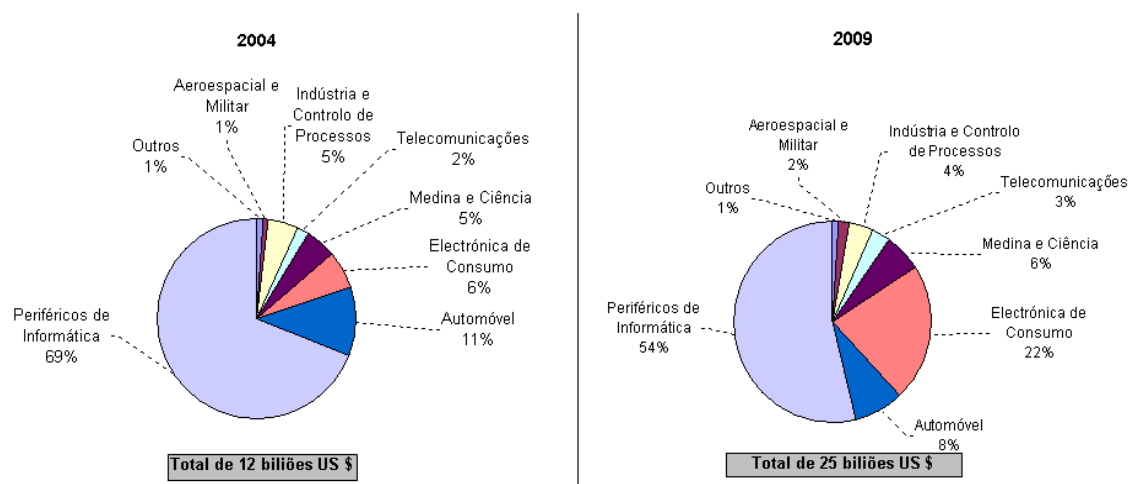


Figura 1.3: Tendência de mercado para as micro tecnologias (Wicht and Bouchaud, 2005)

O controlo industrial, a área aeroespacial e defesa revelam tendências similares embora com variações mais ligeiras, dado o seu menor peso neste contexto. As telecomunicações apresentam um crescimento ligeiro em termos percentuais, fruto da estabilização de consumo que este sector tem apresentado nos últimos anos. A medicina denota igualmente um ligeiro crescimento percentual, não sendo o sector de actividade que mais utiliza micro e nano-tecnologias, tem sido sem qualquer dúvida o grande eixo de desenvolvimento que mais tem impulsionado o seu avanço tecnológico.

1.2 Estrutura e objectivos da dissertação

Os estudos efectuados nesta dissertação têm como objectivo principal analisar o comportamento reológico na micro injecção de materiais termoplásticos. Este estudo insere-se na importância que as micro tecnologias têm vindo a ganhar no seio tecnológico e industrial do século XXI.

No capítulo 2 é examinado o estado da arte dos micro processos de transformação de materiais plásticos. São analisadas as suas potencialidades, principais características e equipamentos. Os processos são classificados e agrupados por directos ou indirectos.

O capítulo 3 apresenta-se como o estado da arte do processo de micro injecção. Nele se focaliza a descrição do processo, as suas variantes, os equipamentos existentes no mercado e a simulação computacional.

A fase experimental é desenvolvida nas duas etapas do capítulo 4. Inicialmente é elaborado um estudo comparativo, no qual se procede à comparação dos resultados obtidos nesta dissertação com os de um estudo de interesse publicado, seguindo-se um conjunto de estudos de enchimento de uma micro peça considerada relevante para o objectivo da dissertação.

2 ESTADO DA ARTE – MICRO PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

2.1 Introdução

Os micro processos de fabricação consistem nas técnicas de fabricação à escala micrométrica ou mesmo abaixo do micrómetro. Estes processos definem-se como a produção de componentes ou dispositivos com poucas centenas de micrómetros de dimensão e com tolerâncias de poucos micrómetros. O termo também se aplica a componentes ou conjunto de componentes com características medidas em micrómetros (Evans, 2001).

Os processos podem ser classificados como sendo directos ou indirectos. Esta classificação depende se o ónus se encontra do lado do produto final (processos directos) ou do lado da ferramenta para a obtenção do mesmo (processos indirectos). A Figura 2.1 apresenta os processos classificados como directos ou indirectos, em estudo neste capítulo.

Micro processos de transformação de materiais plásticos

Directos	Indirectos
Litográficos	Micro injecção
Micro SL	Micro hot-embossing
2PP	Micro RIM
Micro SLS	Micro extrusão
Ablação laser	

Figura 2.1: Micro processos de transformação de materiais plásticos

Para além da classificação directos/indirectos, segundo Vasco *et al* (2005), os processos podem ser classificados por aditivos, se ocorrer deposição de material, substractivos, se ocorrer remoção de material ou híbridos, se ocorrer a combinação dos processos anteriores.

A Figura 2.2 expõe a evolução da escala dos processos aditivos e substractivos. Verifica-se que nas últimas décadas se tornou possível uma grande miniaturização dos processos substractivos. Nesta figura está patente que a tendência de evolução das micro/nano

tecnologias consiste na interacção entre as mesmas. Esta tendência começa actualmente a fazer-se sentir com o aparecimento de vários processos híbridos de micro fabricação.

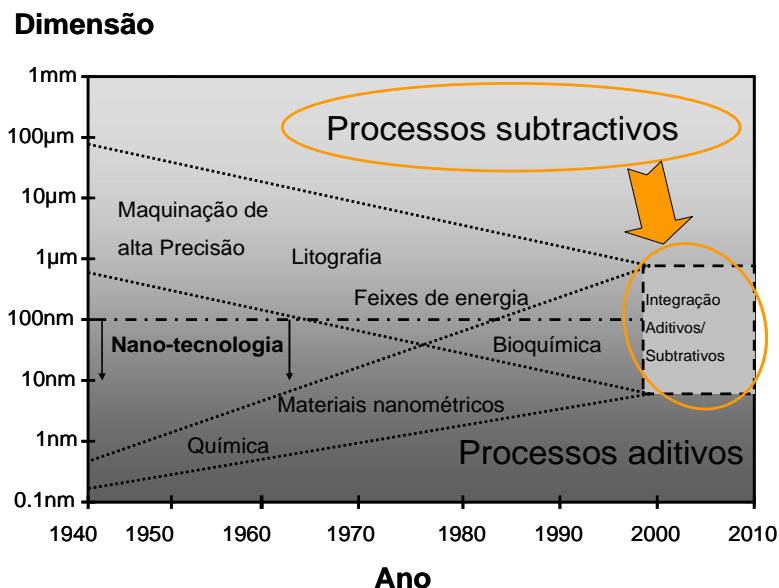


Figura 2.2: Evolução da escala dos processos aditivos e substractivos (Menz *et al*, 2006)

2.2 Fabrico directo

. Este sub-capítulo resume os principais micro processos directos de transformação de materiais plásticos:

- Processos litográficos;
- Micro estereolitografia;
- Foto polimerização bi-fotónica;
- Micro sinterização selectiva por LASER;
- Ablação LASER.

2.2.1 Processos litográficos – LIGA

Os processos litográficos foram os primeiros a demonstrar deter os requisitos necessários ao fabrico de micro componentes devido à sua elevada precisão (Vasco, 2006).

A designação LIGA é o acrónimo para o alemão *Litographie Galvanik Abforming*. Esta expressão resume as três principais fases do processo:

1. Litografia;
2. Electrodeposição de material;
3. Técnica de produção.

2.2.1.1 LIGA raio-X

Este processo foi desenvolvido na década de 80 pelo *Research Center FZK* em Karlsruhe (Hornes *et al*, 2003).

Princípio de funcionamento

O processo LIGA raio-X (Figura 2.3) utiliza como princípio a emissão de radiação, situada na gama raio-X, através de uma máscara colocada sobre um material de suporte, que incorpora um polímero de base e um material que funciona como revelador. A máscara contém a geometria da área sujeita à exposição da radiação, o que condiciona o tipo de geometrias que se podem obter por este processo (Vasco, 2006).

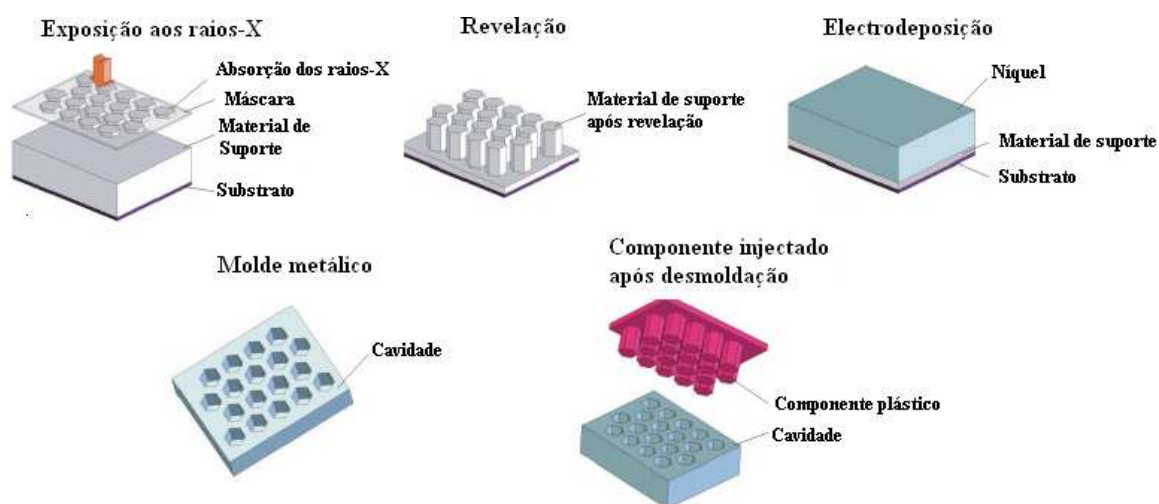


Figura 2.3: Fases do processo LIGA raio-X (Vasco, 2006)

Materiais

Segundo Nasrullah (2004) os materiais de suporte utilizados podem ser positivos ou negativos. Os materiais positivos, quando expostos à radiação, sofrem uma degradação tornando as áreas expostas solúveis por acção de um revelador. Por sua vez, nos materiais negativos, as áreas expostas sofrem um processo de cura tornando apenas solúveis as áreas não expostas à radiação.

A existência de materiais positivos e negativos provoca duas técnicas distintas do processo, dependendo do material utilizado. Na Figura 2.4 o processo esquematizado utiliza materiais positivos onde a radiação quebra as cadeias moleculares permitindo que o material exposto possa ser removido pelo revelador. Por sua vez, o processo apresentado na Figura 2.5 utiliza materiais negativos onde são formadas novas ligações moleculares (ligações cruzadas), o que faz com que as estruturas expostas sejam mais resistentes e o revelador remova o material excedente.



Figura 2.4: LIGA raio-X com material de suporte positivo (Vasco, 2006)

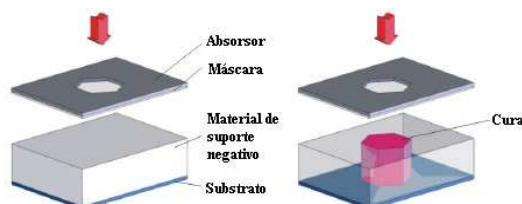


Figura 2.5: LIGA raio-X com material de suporte negativo (Vasco, 2006)

Na produção de micro componentes é necessário que os polímeros utilizados na produção do molde tenham baixas viscosidades.

Vantagens e desvantagens

Este processo apresenta, comparativamente aos outros processos LIGA, as seguintes vantagens e desvantagens:

- Vantagens:
 - Elevada razão de aspecto, até um máximo de 100:1;
 - Inexistência de limitações no que se refere a objectos de secção constante;
 - Utilizar uma grande variedade de materiais: polímeros, metais e cerâmicos;

- Recorrer a sistemas avançados de exposição à radiação e ser possível obter geometrias 3D;
- Utilizar técnicas e materiais de suporte particulares e poder alcançar estruturas complexas ou parcialmente móveis.
- Desvantagens:
 - Custo superior quando comparado com outros processos LIGA;
 - Requer a utilização de máscaras, tornando o processo mais moroso e dispendioso.

2.2.1.2 LIGA UV

Este processo é uma alternativa ao processo LIGA raio-X, utiliza radiação UV e apresenta resoluções, ainda que eficazes, mais limitadas que o processo LIGA original.

Princípio de funcionamento

Este processo, esquematizado na Figura 2.6, inicia-se com a degradação do material de suporte por irradiação de luz UV, através de uma ou mais máscaras, dependendo da geometria pretendida. Depois de obtida a geometria é depositado metal por electrodeposição dando assim maior resistência ao molde. Por último dá-se o acabamento superficial e remoção do material de suporte.

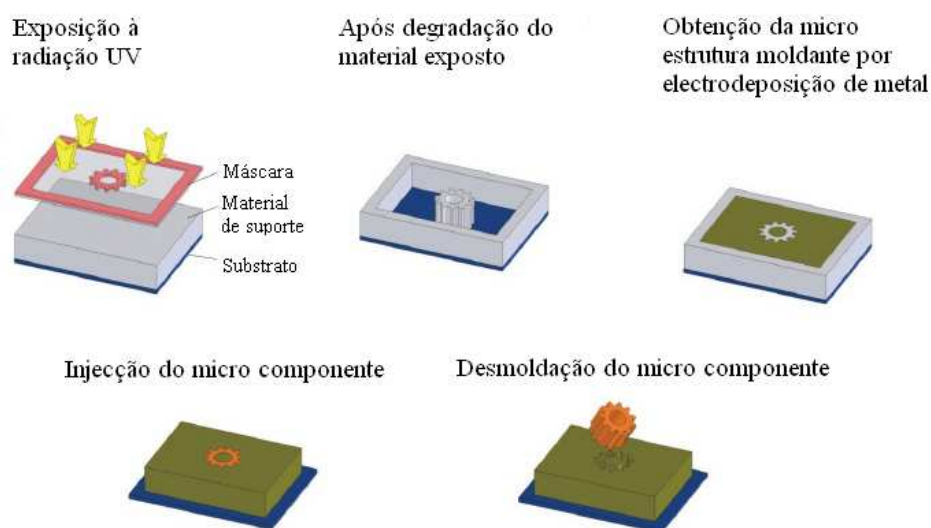


Figura 2.6: Fases do processo LIGA UV (Vasco, 2006)

Materiais

Os materiais mais utilizados são o PMMA (polimetil-metacrilato) e o SU8. Este último possibilita a obtenção de peças com razão de aspecto superior ao PMMA, contudo a sua remoção após a electrodeposição é mais complexa.

Vantagens e desvantagens

- Vantagens:
 - Custo mais reduzido que o LIGA raio-X uma vez que as máscaras não necessitam de ser realizadas em materiais absorventes de radiação. Além disso a fonte UV é menos dispendiosa que a raio-X;
 - Processo com parâmetros bem estabelecidos;
 - Capacidade de produção em lotes;
 - Grande variedade de aplicações.
- Desvantagens:
 - Menor resolução que a obtida no LIGA raio-X;
 - Menor razão de aspecto para as peças produzidas;
 - Requer a utilização de máscaras, tornando o processo mais moroso e dispendioso que o LIGA IB e o LIGA LASER.

2.2.1.3 LIGA IB

A sigla IB é um acrónimo do inglês *Ion Beam*, que significa feixe de iões. Este processo é um desenvolvimento mais recente do processo LIGA.

Princípio de funcionamento

Neste processo, o material de suporte não é irradiado por um feixe de luz mas por um feixe de iões de dimensões sub-micrométricas, na ordem dos 100nm (Vasco, 2006).

O material irradiado encontra-se dentro de uma câmara de vácuo sendo incidido perpendicularmente pelo feixe de iões. Os vários graus de liberdade da mesa de suporte permitem a criação de ângulos de incidência do feixe, o que possibilita a obtenção de geometrias 3D e aumenta a razão de aspecto dos componentes. A altura do componente é controlada pela energia do feixe e os componentes obtidos são geralmente em PMMA.

Vantagens e desvantagens

A grande vantagem deste processo reside no facto de não necessitar de máscara para a produção de componentes, o que implica uma redução de custos e de tempo relacionada com a produção das máscaras (Munnik *et al*, 2003).

O fraco desenvolvimento deste processo é a sua maior desvantagem, pelo que apenas é adequado à produção de pequenas séries, protótipos, moldes e máscaras.

2.2.1.4 LIGA LASER

O primeiro relatório de sucesso do processo LIGA LASER foi no ano de 1995 por Arnold, (1995).

Este processo baseia-se na obtenção de moldes em PMMA com uma resina foto resistente através de irradiação de um feixe LASER e permite ainda a produção de *masters* por electrodeposição de um metal.

2.2.2 Micro estereolitografia

A micro estereolitografia (μ -SL) é uma evolução dos processos estereolitográficos com o propósito de obter micro componentes. Este processo é, grosso modo, análogo à estereolitografia convencional mas com algumas diferenças inerentes à miniaturização do processo.

Princípio de funcionamento

Como já foi referido no início deste sub-capítulo, o princípio de funcionamento da micro estereolitografia é muito semelhante ao processo de estereolitografia convencional.

Estereolitografia convencional

A estereolitografia consiste na solidificação (cura) de resinas foto-sensitivas ou termo-sensitivas de baixa viscosidade através de uma fonte LASER adequada (Matias, 2007).

A estereolitografia revela-se como um processo versátil uma vez que podem ser utilizadas várias técnicas dependendo do componente, do material e do equipamento utilizado (plataforma ascendente ou descendente).

Nos processos estereolitográficos, a construção do modelo 3D ocorre camada a camada. Uma fonte de luz irradia uma camada de resina que se encontra numa plataforma móvel. A radiação provoca a polimerização da resina formando uma camada de material sólido. De seguida a plataforma sobe ou desce (dependendo do tipo de equipamento) um determinado valor correspondente à espessura da camada seguinte. Esta sequência repete-se até se obter a geometria pretendida.

Fudim (1989), Xue and Gu (1996) e Jardini *et al* (2003) classificaram os processos estereolitográficos de prototipagem rápida em dois grupos: processos de irradiação por máscara, em que a radiação é policromática e emitida por uma ou mais lâmpadas, sendo a geometria da camada definida por uma máscara; processos de irradiação por LASER, em que o material é irradiado por um feixe LASER de radiação monocromática. Bártoło (2001) divide estes processos segundo dois tipos de iniciação: bi-fotónica e mono-fotónica.

Micro estereolitografia

Segundo Gaspar (2006) os processos de micro estereolitografia dividem-se conforme o esquema representado na Figura 2.7.

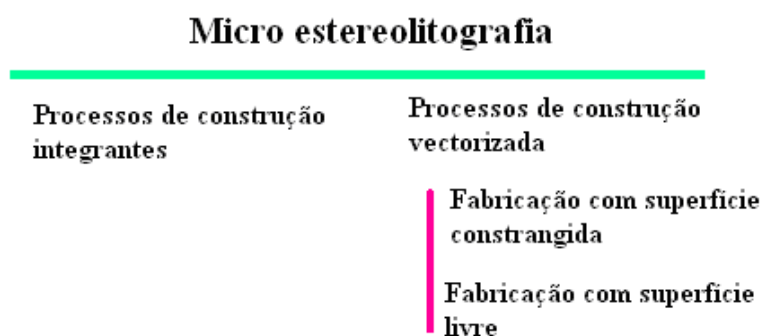


Figura 2.7: Micro estereolitografia

O processo de fabricação com superfície constrangida foi desenvolvido por Takagi (1993) e por Ikuta (1993) (Tabela 2.1). Neste processo, cada camada de resina é polimerizada por um feixe LASER que traça vectorialmente a secção correspondente a cada camada através

de uma janela transparente, mantendo o foco de radiação estacionário e deslocando a plataforma no plano de construção. A existência de um sistema óptico adequado permite focar o feixe de radiação em pontos de dimensões micrométricos. Durante a translação da plataforma o feixe de luz é ocultado por acção de um obturador evitando-se assim polimerizações indesejadas.

Tabela 2.1: Primeiros sistemas de fabricação com superfície constrangida (Gaspar, 2006)

	Processo proposto por Takagi (1993)	Processo proposto por Ikuta (1993)
Designação do processo	Foto-formação	Processo IH
Fonte luz	LASER He-Cd, UV (325nm)	Lâmpada xénon, UV
Tipo de constrangimento	Janela quartzo	Janela transparente
Mecanismo de construção	Ascendente	Descendente
Dimensões máximas das peças a obter	20 x 20x 20 mm	10 x 10 x 10 mm
Resolução máxima	5 μ m	8 μ m
Tipo resina	Acrílica	Não especificada

O processo de fabricação com superfície livre é em tudo semelhante ao processo descrito anteriormente, com a excepção de a superfície da resina líquida não ser constrangida, o que obriga existir um nivelador para controlar a espessura de cada camada a polimerizar, influenciando de forma negativa o tempo de construção. Esta técnica desenvolvida por Zissi (1996) e Zhang (1998) utiliza resinas de muito baixa viscosidade (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Características dos primeiros sistemas de fabricação com superfície livre (Gaspar, 2007)

	Processo proposto por Zissi (1996)	Processo proposto por Zhang (1998)
Designação do processo	Micro estéreo-foto-litografia	Micro estereolitografia
Fonte Luz	LASER He-Cd, UV (325nm)	Lâmpada Xénon, UV
Tipo de constrangimento	LASER de Árgon	LASER de Árgon
Monitorização da superfície	LASER diodo	Câmara de CCD
Resolução máxima	20 μm	1-2 μm
Tipo resina	Resina base Acrílica	Resina base Acrílica

O processo integrante de micro estereolitografia corresponde a uma técnica mais recente que utiliza um gerador padrão dinâmico para modelar o feixe de luz proveniente da fonte de radiação segundo a imagem de cada camada a construir (Bertsch *et al*, 1997). Esta imagem é em seguida reduzida e focada sobre a superfície da resina a solidificar através de um sistema óptico apropriado. Este processo caracteriza-se por elevadas velocidades de construção e ausência de polimerizações indesejadas devido ao facto da densidade do fluxo de luz incidente sobre a superfície da resina ser baixo quando comparado com os processos anteriores. A resolução máxima é da ordem dos 5 μm .

Aplicações

Esta tecnologia é, regra geral, utilizada para o fabrico dos seguintes tipos de produto:

- Micro sistemas electro-mecânicos (MEMS);
- Aplicações médicas (Figura 2.8a);
- Micro fluídica (Figura 2.8b).

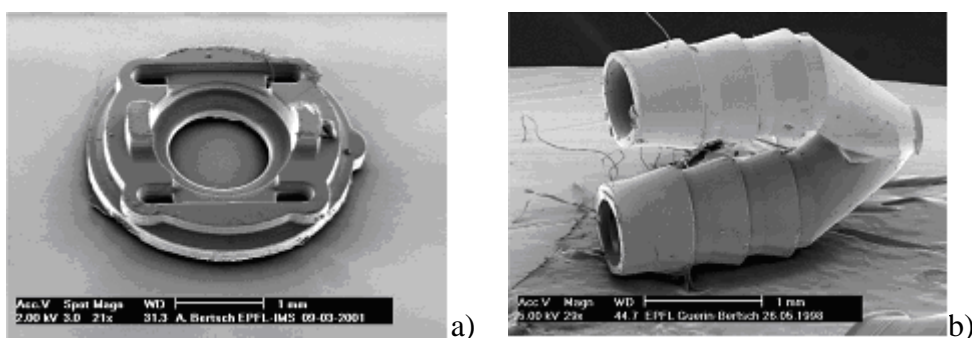


Figura 2.8: Exemplos de aplicações de μ -SL (Bertsch *et al*, 2003)

2.2.3 Foto-polimerização bi-fotónica

A foto-polimerização bi-fotónica (2PP – *Two Photon Polymerization*) é uma técnica de nano e micro fabricação 3D com um enorme potencial e consiste na polimerização de um polímero foto-sensível por excitação das moléculas do polímero para estados de energia superiores provocados pela absorção de dois fótons emitidos por um LASER femtosegundo (fs), os quais permitem uma focalização da radiação muito mais precisa no tempo e no espaço (Ostendorf and Chichkov, 2006).

A resolução do processo é determinada pela dimensão do *voxel* (unidade de volume), isto é, quanto menor o *voxel* maior a resolução do processo e mais lenta a construção do elemento. A dimensão possível de um *voxel* depende da intensidade do LASER e do tempo de irradiação.

Materiais

Os compostos foto-sensíveis ou foto-resistentes são constituídos regra geral por três componentes: um polímero (resina termoendurecível), um material sensível e um solvente que tem como função facilitar o transporte aos componentes activos e permitir a pulverização do material de suporte. O material sensível ajuda no controlo das reacções foto-químicas, melhorando o desempenho do material de suporte. Os materiais foto-resistentes dividem-se em dois grupos: negativos e positivos (*Idem*).

A polimerização dos materiais foto-resistentes positivos ocorre por ruptura das cadeias moleculares durante as reacções fotoquímicas provocada pela incidência do raio LASER. Essa ruptura provoca um incremento de fluidez ao material (*Ibidem*).

Nos materiais foto-resistentes negativos, a polimerização sobrevém do desenvolvimento de ligações cruzadas durante as reacções fotoquímicas, que, analogamente aos materiais foto-resistentes positivos, são provocadas pela radiação. Neste processo a viscosidade dos materiais aumenta e estes podem ser divididos em dois sub-grupos: sólidos e líquidos (Ostendorf and Chichkov, 2006).

Um dos materiais mais utilizados neste processo é ORMOCER® – abreviatura do Inglês para Organic Modified Ceramic (Vasco, 2006), que é um composto híbrido (orgânico/inorgânico) resultante da combinação de três grupos de materiais: silicone, polímeros orgânicos e materiais cerâmicos (Institut Silicatforschung, 2003). A evolução dos ORMOCER® conduziu à descoberta de alguns derivados, como o ORMOCORE/ORMOCLAD, o ORMOCLOMP e o ORMOPRIDE (Micro resist technology©, 2007).

Materiais como o SU8 e o HPEA – *Hyperbranched PolyEster Acrylate* são também materiais utilizados neste processo (Kou *et al*, 2004).

Características do processo

Este processo, à semelhança da micro estereolitografia (μ -SL), produz componentes 3D por radiação LASER, mas tem algumas diferenças que lhe conferem características únicas: a irradiação da resina não ocorre por radiação contínua mas por impulsos LASER (Figura 2.9) de duração aproximada de 100 fs (100×10^{-15} s) e focalizados num determinado volume de material – voxel; o comprimento de onda da radiação situa-se na zona infra-vermelho (IR), enquanto na μ SL se situa no ultra violeta (Ostendorf and Chichkov, 2006).

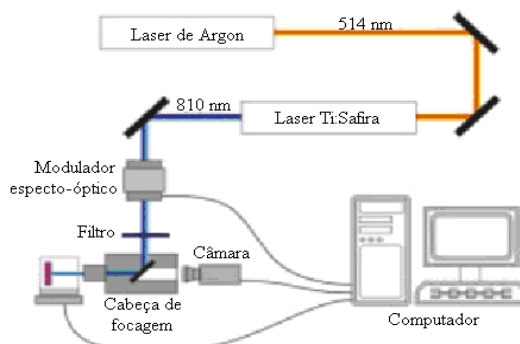


Figura 2.9: Diagrama esquemático do processo de 2PP (Vasco, 2006)

Os materiais foto-sensíveis são, regra geral, transparentes à radiação IR e altamente absorventes à radiação UV, o que permite que a irradiação/polimerização possa ser focalizada, evitando a edificação tridimensional camada a camada e permitindo construir componentes com elevada complexidade sem o recurso a suportes.

Devido à natureza não linear deste processo, a resolução do raio LASER pode ser controlada pelo valor da energia emitida e pelo número de impulsos aplicados, o que permite resoluções na ordem dos 100nm. A Figura 2.10 apresenta a elevada resolução deste processo: as pernas da aranha têm cerca de 1µm de diâmetro e a qualidade superficial da Vénus é elevada, com poucos micrómetros de espessura e contornos complexos.

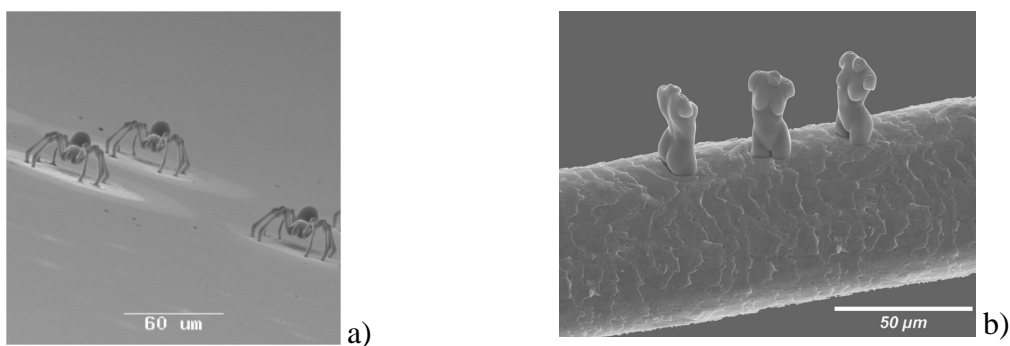


Figura 2.10: Micro aranhas a); micro Vénus num cabelo humano b), (Laser Zentrum Hannover©, 2006)

Aplicações

As aplicações do processo de foto polimerização bi-fotónica são, na sua grande maioria, no ramo da medicina (medicina, medicina dentária e oftalmologia) e em componentes ópticos e electrónicos.

Vantagens e desvantagens

- A combinação das características do processo com os materiais utilizados confere-lhe algumas vantagens:
 - Modelos tridimensionais com as seguintes características:
 - Excelentes propriedades mecânicas;
 - Excelente resistência química e térmica;
 - Elevada transparência óptica;
 - Baixo custo.
 - Excelente resolução (100nm);

- Possibilidade de construir componentes 3D de geometria complexa sem recorrer à utilização de suportes, uma vez que a polimerização é efectuada *voxel a voxel*.
- Este processo apresenta algumas limitações:
 - Dificuldade em construir peças de dimensões superiores a 100mm;
 - Materiais limitados;
 - Difícil manuseamento dos componentes fabricados devido às suas dimensões reduzidas.

Fabricantes/Investigadores

O equipamento da Figura 2.11 foi desenvolvido pelo *Laser Zentrum Hannover e.V.* que é um dos centros de investigação que mais contribui para o desenvolvimento desta tecnologia. Este sistema é composto por um LASER fs Ti:Safira, um scanner e um motor linear. O LASER de Ti:Safira com 200 mW de potência emite radiações com comprimento de onda de 800nm, 73 MHz de frequência e um impulso de 100fs.

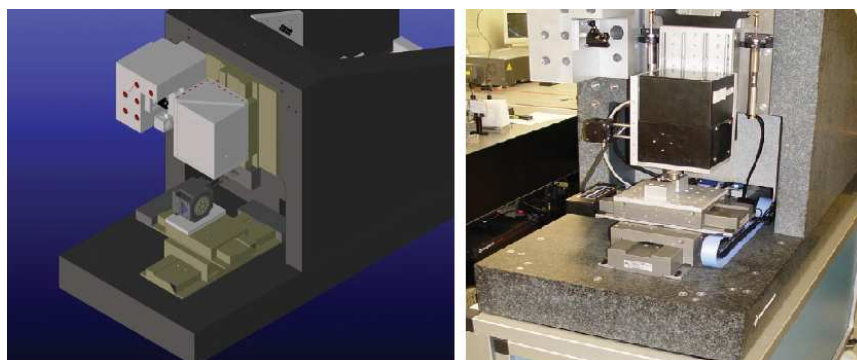


Figura 2.11: Esquema 3D Microstructuring System do Laser Zentrum Hannover e.V. (esquerda); fotografia (direita), (Ostendorf and Chichkov, 2006)

O processo de foto-polimerização bi-fotónica revela ser muito eficaz na construção de micro componentes tridimensionais, pois, ao contrário de outros processos litográficos, a construção não é efectuada camada a camada, mas sim *voxel a voxel*, pelo que, utilizando uma técnica adequada é possível construir componentes com elevado grau de complexidade sem o recurso de suportes.

Esta tecnologia ainda tem um longo caminho a percorrer até se tornar comercializável, contudo, já revelou ter grande utilização em algumas áreas, nomeadamente na óptica e médica.

2.2.4 Micro sinterização selectiva por LASER

A sinterização selectiva por LASER (SLS, acrónimo para o inglês *Selective LASER Sintering*) é um processo de protótipagem rápida, desenvolvido por Deckard (1986). Este processo (Figura 2.12) utiliza um LASER emitindo um feixe de radiação na gama do infravermelho para selectivamente aquecer e fundir material em pó (Shi *et al*, 2004).

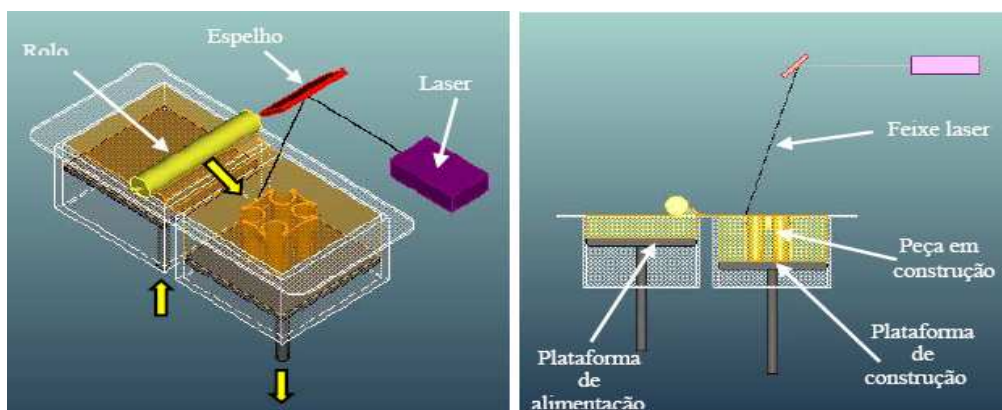


Figura 2.12: Processo SLS (Gaspar, 2006).

Micro sinterização selectiva por LASER

O desenvolvimento da micro sinterização selectiva por LASER (μ -SLS) tem ocorrido essencialmente na Europa. Em 2003, *Ragenfuß do Laserinstitut Mittelsachsen* (Alemanha) apresenta o primeiro sistema de μ -SLS capaz de produzir componentes numa grande variedade de metais, com resolução inferior a $30\mu\text{m}$, razão de aspecto de 12 e valores de rugosidade RA na ordem dos $1,5\mu\text{m}$ (Regenfuß *et al*, 2004; Petsch *et al*, 2004). O trabalho de Ragenfuß esteve na base do sistema microSINTERING da 3D-Micromac AG (Alemanha) indicado na Figura 2.13 (*Idem*). O processo de construção decorre numa câmara de vácuo em aço inoxidável com uma janela de quartzo através da qual é realizado o varrimento LASER. A alimentação de pó faz-se pelo movimento rotativo do alimentador. A utilização de dois alimentadores em simultâneo possibilita a combinação de materiais e permite a obtenção de componentes bi-material.



Figura 2.13: Detalhe de operação da plataforma de processamento (Petsch *et al*, 2004)

A fonte LASER inicialmente testada em μ -SLS foi um LASER pulsado *Q-switched Nd:YAG*, operando em modo TEM00 e com comprimento de onda 1064 nm. Recentemente foram explorados LASERS multimodo e diferentes comprimentos de onda. As intensidades do pulso são ajustadas de acordo com as propriedades requeridas, a geometria da peça e o material a usar através da utilização de um *software* específico designado por *IVS STL converter* (Regenfuß *et al*, 2007). Pulsos de elevada densidade originam elevada rugosidade superficial.

Materiais

- MicroSINTERING:
 - Tungsténio;
 - Cobre;
 - Alumínio;
 - Ouro;
 - Titânio;
 - Prata;
 - Molibdénio.

- Lumex 25C:
 - Ligas aço/cobre;
 - Ligas ferro/cobre/níquel.

Aplicações

O processo de μ -SLS tem aplicabilidade na indústria automóvel, moldes, ferramentas, telecomunicações, aplicações médica e mecânica de precisão. As Figura 2.14 e Figura 2.15 apresentam exemplos de modelos obtidos por μ -SLS.

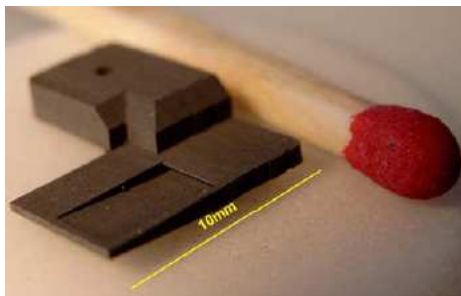


Figura 2.14: Componente tridimensional (Regenfuß *et al*, 2007)

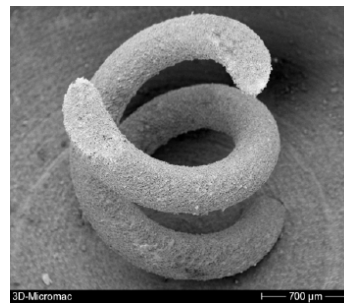


Figura 2.15: Estrutura em hélice dupla para ilustrar a capacidade de construção sem necessidade de suportes (Regenfuß *et al*, 2007)

A aplicabilidade dos componentes obtidos por μ -SLS no processo de micro injecção tem como base a sua resistência à fadiga térmica.

Vantagens e desvantagens

- As principais vantagens do processo são:
 - Fabricação rápida capaz de produzir componentes funcionais;
 - Processamento directo de materiais metálicos;
 - Componentes com boas propriedades mecânicas;
 - Capacidade para processar materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos;
 - Produção de componentes bi-material.
- As principais desvantagens do processo são:
 - Custo do equipamento e materiais utilizados;
 - Porosidade e baixas velocidades de fabricação (no caso particular do sistema LUMEX).

Fabricantes

As Figura 2.16 e Figura 2.17 apresentam dois dos principais equipamentos de μ -SLS.

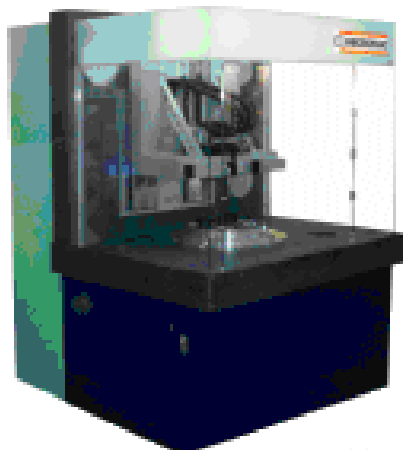


Figura 2.16: 3D-MICROMAC AG: PS-1064-1



Figura 2.17: Matsuura: LUMEX 25 C

2.2.5 Ablação LASER

O processo de maquinação de metais assistido por LASER (sublimação de metais) foi estudado pela primeira vez em detalhe por Läßiger em 1995 (Pfleging *et al*, 2002) e é utilizado para maquinar materiais metálicos e não metálicos. Neste processo, a fonte de energia é um LASER que foca a energia óptica na superfície da peça. A elevada energia altamente focalizada funde e evapora o material da peça duma maneira controlada.

O princípio da remoção de material por LASER resulta da acção do feixe de LASER que é focado na superfície do material onde a energia convertida em calor é absorvida (Figura 2.18). A máxima profundidade onde a absorção ocorre é chamada profundidade de penetração.

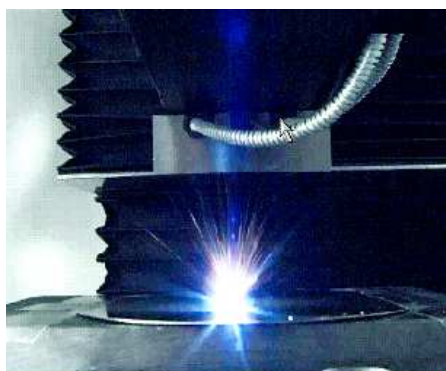


Figura 2.18: Processamento por ablação LASER (Lasertec Pfronten GmbH, 2003)

Apesar das múltiplas e possíveis aplicações desta técnica, ela sempre manifestou alguns problemas, nomeadamente o sobreaquecimento das zonas adjacentes às processadas e a formação de resíduos. No final do impulso LASER, o material fundido é expulso sob a forma de vapor. A elevada taxa de vaporização de material provoca uma onda de choque e a elevada pressão de vapor sobre a superfície liquefeita aumenta consideravelmente a temperatura. Estes fenómenos fazem com que nas áreas adjacentes às processadas se formem rebordos indesejados e endurecimento superficial, devido às elevadas temperaturas e à sua posterior re-solidificação (Bado *et al*, 2008).

Uma enorme variedade de fontes LASER pode ser utilizada como processo de remoção de material, pois para cada aplicação específica existe um sistema cujo desempenho é o mais adequado.

As duas principais variáveis a considerar na escolha da tecnologia LASER são o comprimento de onda (do IR ao UV) e a duração dos impulsos desde ondas contínuas até feixes pulsados com frequências elevadíssimas e que conduzem a tempos de descarga na ordem dos femtosegundos (10-15 segundos).

Deste mecanismo da remoção de material emergiram tecnologias como a furação por LASER, corte por LASER, gravação a LASER e, mais recentemente, ablação LASER 3D.

Vantagens

As tecnologias baseadas nas radiações LASER têm as seguintes e decisivas vantagens em relação aos métodos convencionais:

- Excelente controlo de feixe e fácil conversão para operação automática;
- Sem contacto físico peça/ferramenta, o que acarreta forças de processamento nulas, não provocando, assim, o desgaste da ferramenta;
- Baixa quantidade de calor induzida para a peça, devido à elevada densidade de energia que é concentrada no ponto mínimo que está a ser processado;
- Alta velocidade de processamento combinada com excelente reprodutibilidade dos resultados do processo;
- Permite o processamento de materiais muito duros, frágeis e macios;
- Maquinação de contornos com elevado grau de complexidade quando combinada com a tecnologia/equipamento adequados;
- Execução duma enorme variedade de geometrias sem mudança de ferramenta;
- Redução dos tempos não produtivos devido à activação e desactivação sem paragem do feixe LASER;
- Fácil integração com outras tecnologias de micro fabricação.

2.3 Fabrico indirecto

A condição essencial para o sucesso dos micro sistemas no mercado é a produção efectiva e a custos concorrenciais de micro estruturas em larga escala (Piotter *et al*, 1997). Esta frase resume de forma eficaz a importância dos processos de produção em série na massificação das micro tecnologias no dia-a-dia.

Os custos de produção para micro ferramentas é bastante relevante, contudo, após a produção da mesma, é possível produzir séries extensas de micro componentes sem sofrer um acréscimo de custo relevante. Os custos para a matéria-prima empregue são bastante baixos dado o reduzido volume de material utilizado. Assim, considerando os polímeros como matéria-prima e o seu vasto leque de aplicações, é possível produzir micro componentes plásticos para quase todo o tipo de aplicações (Heckele and Schomburg, 2004).

Dois dos processos de replicação com equipamentos comerciais disponíveis no mercado tiveram sucesso relevante na produção das micro tecnologias: a micro injecção e a micro gravação a quente. Estas duas técnicas competem no mesmo segmento de mercado dependendo da geometria do componente, contudo, devem ser olhadas como processos complementares e não como concorrentes (Piotter *et al*, 2004).

Para além da micro injecção e da micro gravação a quente, existem outros processos tais como a micro moldação por reacção, a micro moldação por injecção-compressão e a micro termoformação, tendo os dois primeiros processos contribuído fortemente para o desinteresse comercial dos três últimos (Heckele and Schomburg, 2004).

2.3.1 Micro injecção

O processo de micro injecção é o processo de replicação de micro componentes poliméricos em larga escala mais eficaz. Por este motivo, ele é de grande importância para esta dissertação, pelo que se dedica todo o capítulo 3 ao seu desenvolvimento.

2.3.2 Micro moldação com reacção

A micro moldação com reacção é uma versão *down-scaled* do RIM (acrónimo para o Inglês *Reaction Injectin Molding*) tradicional. À semelhança do processo convencional, são utilizados dois reagentes, o polioli e o isocianato, que são injectados num molde fechado e quando misturados iniciam uma operação de polimerização.

A utilização do μ -RIM foi retardada devido a dificuldades verificadas, à escala micrométrica, na homogeneidade da mistura dos dois reagentes. Além disso, a reacção química deve ocorrer dentro das micro estruturas do molde, o que torna o processo extremamente difícil de controlar. Actualmente, a mistura é injectada mas o processo de cura só é iniciado já dentro do molde por incidência dos raios UV, o que diminui o tempo de ciclo. Esta nova possibilidade de cura controlada abriu a aplicação do RIM à escala micrométrica (Heckele and Schomburg, 2004).

2.3.3 Micro gravação a quente

O método de gravação a quente inicialmente desenvolvido por Forschungszentrum Karlsruhe permite que os seus produtos possuam micro estruturas delicadas com elevada razão de aspecto e tensões internas reduzidas (Worgull *et al*, 2006).

A micro gravação a quente é também um processo altamente produtivo para a produção em série de micro componentes ou micro estruturas e bastante flexível porque as ferramentas e o polímero em processamento podem facilmente ser alterados, o que encurta o tempo de preparação (Piotter *et al*, 2004).

Esta técnica é amplamente utilizada no fabrico de micro estruturas para MEMS, sensores ópticos ou chips para aplicações médicas (Worgull *et al*, 2006; Chang and Yang, 2004).

Como se verifica na Figura 2.19, a micro gravação a quente consiste em três fases fundamentais (Piotter *et al*, 2004):

1. Inserir uma película aquecida de filme termoplástico na ferramenta;
2. Pressionar a ferramenta micro estruturada contra a película de polímero com uma força pré-determinada dentro de uma câmara em vácuo;
3. Arrefecer o conjunto fazendo com que a ferramenta liberte a película de polímero micro estruturada.

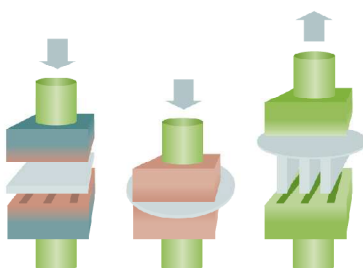


Figura 2.19: Fases do processo de micro gravação a quente (Piotter *et al*, 2004)

2.3.4 Micro termoformação

A micro termoformação é empregue na formação de filmes termoplásticos finos micro estruturados. Por acção da introdução de gás pressurizado, a cavidade é submetida a vácuo enquanto o filme é fixado ao molde, devidamente aquecido e pressionado contra as micro estruturas do mesmo. O filme termoformado é então arrefecido e desmoldado (Figura 2.20).

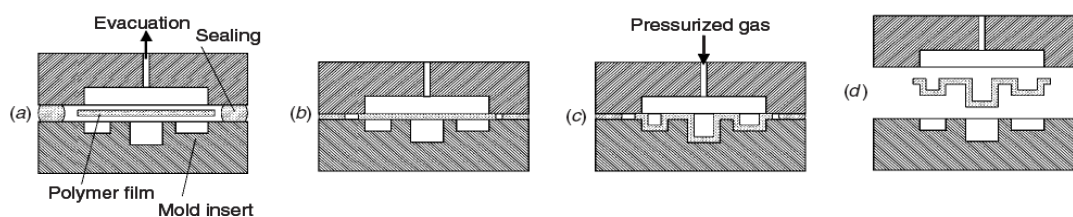


Figura 2.20: Fases do processo de micro termoformação (Heckele and Schomburg, 2004)

Este processo é caracterizado pela elevada flexibilidade do filme, o que facilita a tarefa da desmoldação de micro estruturas inclusivamente em pequenas zonas negativas, mas não é de todo adequado à obtenção de micro componentes com elevadas razões de aspecto.

3 MICRO INJECCÃO

A moldação por injeccção de materiais poliméricos é um processo tecnológico adequado para a produção em larga escala, atingindo padrões de qualidade elevados. Contudo, a moldação por micro injeccção baseada em máquinas modificadas é aplicada para a manufactura de micro estruturas em séries de larga escala (Piotter *et al*, 1997).

Os primeiros passos no desenvolvimento de máquinas de injeccção dedicadas à micro injeccção foram iniciados em meados da década de 90. O objectivo inicial era reduzir ao mínimo a quantidade de material a injectar, baixar o peso da injeccção para apenas 0.025g e, consequentemente, reduzir o tempo de residência do material no cilindro da unidade de injeccção (Piotter *et al*, 2001).

Actualmente, a micro injeccção é projectada especificamente para a produção em massa de componentes pesando menos do que 0.001g, dimensões inferiores a 1mm e a capacidade de reproduzir detalhes de dimensão na gama das dezenas de nanómetros. O processo de micro injeccção é sujeito a complexas mudanças termodinâmicas no fundido e nas cavidades, requerendo um alto controlo de precisão das temperaturas de processamento. Esta tecnologia que se encontra ainda em desenvolvimento, o comportamento do escoamento do material, assim como a dependência da temperatura requerem mais investigação e trabalho experimental (Martin *et al*, 2003).

3.1 Descrição do processo

De um ponto de vista superficial, o processo de micro injeccção é, à excepção das dimensões dos componentes e dos equipamentos, semelhante ao processo convencional, contudo, neste capítulo serão apresentadas várias dissemelhanças que conferem a este processo particularidades muito específicas. Para uma melhor percepção destas diferenças é importante rever todas as fases do processo e respectivos parâmetros envolvidos:

1. **Fecho do molde:** O molde deve fechar o mais rápido possível sem se danificar. Assim que o molde fecha a máquina aplica uma determinada força de fecho, de modo a evitar que a pressão de injeccção o abra.

2. **Injecção:** O material é injectado para a cavidade do molde com uma determinada pressão e velocidade. A pressão exercida deve ser a suficiente para expulsar o ar que se encontra na cavidade.
3. **Compactação:** Ao contrário da pressão de injecção, a pressão de compactação tem como função minimizar os efeitos da contracção do material e evitar que este recue. É frequente aplicar a pressão de compactação a cerca de 97% do enchimento.
4. **Plasticização:** Durante a plasticização a unidade de injecção funde o material e, recorrendo a um fuso ou a um pistão, recolhe a carga requerida para a injecção subsequente.
5. **Abertura de molde e extracção:** Depois de decorrido o tempo de arrefecimento o molde abre e ocorre a respectiva extracção da peça, podendo a mesma ser executada com recurso a extractores, sistemas pneumáticos ou com o auxílio de robots.

As fases do processo de micro injecção são análogas ao processo convencional, porém, os parâmetros, os equipamentos e as ferramentas variam significativamente. Neste processo é necessária uma *interface* molde/máquina muito apropriada.

A arquitectura dos moldes para micro injecção deve ser adequada às características do processo. Relativamente ao sistema de fixação do molde à máquina, e devido às suas reduzidas dimensões, este pode não ser semelhante ao sistema convencional, o que requer que o projectista tenha conhecimentos da máquina de injecção.

A fase de injecção é, sem dúvida, a fase mais complexa de todo o processo e é a que apresenta o maior número de diferenças relativamente ao processo convencional. No processo de micro injecção, os canais de alimentação devem ser reduzidos ao mínimo, assim, o molde e a máquina devem estar preparados para permitir a penetração de unidade de injecção o mais próximo possível da cavidade do molde, caso o sistema seja de canais frios.

Durante a injeção do fundido, o ar da cavidade e os gases são expulsos para o exterior. A colocação de canais de escape de gases pode não ser possível a esta escala, pelo que a introdução de sistemas de vácuo pode ser a solução.

Para que a fase de injeção seja rigorosa, é necessário que a plasticização/dosagem o seja também. Isto criou muitas dificuldades aos fabricantes de equipamentos, uma vez que os sistemas convencionais de fuso ou de pistão se revelaram pouco eficazes. Os sistemas mais eficazes consistem em sistemas híbridos de fuso e êmbolo.

A extracção da peça é uma operação, regra geral, pouco problemática no processo convencional, contudo na micro injeção é uma fase algo complexa. Neste processo o recurso a extractores pode, por duas razões, não ser possível. Primeiro, as reduzidas dimensões da peça impossibilitam esta situação. Em segundo, as elevadas temperaturas do molde provocam que a temperatura de extracção seja muito elevada, o que provocaria marcas profundas dos extractores na peça, contudo esta situação pode ser minimizada com o recurso a sistemas de aquecimento de molde variável (Figura 3.1). Posto isto, verifica-se que os sistemas de extracção mais adequados são os sistemas pneumáticos, o recurso a robots e uma técnica mais recente de vibração ultra-sónica (Giboz *et al*, 2004).

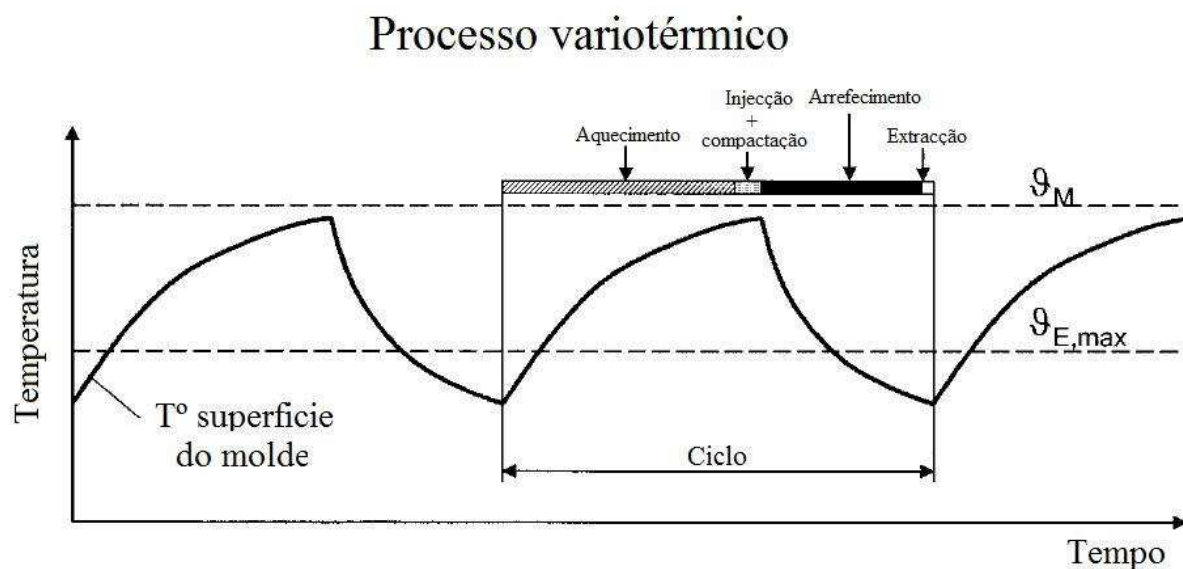


Figura 3.1: Gráfico de variação de temperatura do molde (Gornik, 2004)

Os parâmetros nas várias fases devem ser adaptados às características do processo. Nos capítulos posteriores será analisada a importância dos principais parâmetros. Segundo vários estudos de Sha *et al* (2006) e Shen *et al* (2004) as temperaturas envolvidas são, de todos os parâmetros, as mais importantes. Relativamente à temperatura de fusão, esta deve ser o mais próximo possível da temperatura máxima recomendada pelo fornecedor. A temperatura do molde deve ser superior à temperatura de transição vítrea, para materiais amorfos e superior à temperatura de fusão para materiais cristalinos. A necessidade de elevados valores de temperaturas prende-se com a importância da viscosidade do fundido.

Na injeção convencional o peso da peça é muito superior ao peso dos canais de alimentação, por sua vez, na micro injeção os canais de alimentação representam, na maioria dos casos, cerca de 80% do peso total de injeção. Este facto implica um atraso na compactação da peça, passando dos habituais 97% para 99% ou mesmo 100% do enchimento da peça.

3.2 Variantes do processo

À semelhança do processo convencional, a micro injeção possui algumas variantes que permitem uma maior abrangência de aplicações.

3.2.1 Micro injeção multimaterial

A injeção multimaterial possibilita a obtenção de micro componentes em vários materiais, como diferentes polímeros ou polímeros com elastómeros. Alguns equipamentos já têm sistemas de injeção acoplados à unidade de injeção principal, o que permite que a jusante da máquina de injeção se obtenham micro peças funcionais prontas a utilizar.

3.2.2 Micro injeção/compressão

A micro injeção/compressão é a combinação entre o processo de injeção e o processo de gravação a quente. Esta combinação permite diminuir o problema resultante do aquecimento do polímero pela ferramenta.

O polímero plastificado é injectado pelo fuso com o molde ainda ligeiramente aberto, sendo posteriormente fechado, pressionando o fundido contra as micro estruturas do

molde. Desta forma, é evitado o problema de injeção através de canais de injeção de secção diminuta.

Este processo é utilizado para a produção de CDs e DVDs. Os CDs possuem dimensões críticas, abaixo de 1 μm , mas a razão de aspecto das suas micro estruturas é muito baixa e assim, a desmoldação não constitui um problema (Heckeles and Schomburg, 2004).

3.2.3 Micro injeção de pós

A micro injeção de pós (μ -PIM, acrónimo para o Inglês *Powder Injection Molding*) consiste na injeção de pós cerâmicos ou metálicos. Estes materiais têm algumas propriedades mecânicas superiores aos materiais poliméricos, assim, é importante a produção em massa deste tipo de componentes. As fases deste processo, à semelhança do processo PIM convencional, são:

1. Selecção do pó metálico ou cerâmico e dos ligantes;
2. Preparação e granulação do *feedstock*;
3. Injeção;
4. Remoção do ligante;
5. Sinterização.

O *feedstock* utilizado caracteriza-se como tendo elevada viscosidade, o que dificulta o escoamento nos micro canais.

3.3 Equipamentos

Este capítulo apresenta uma série de equipamentos de micro injeção disponíveis no mercado (Tabela 3.1). Verifica-se que alguns dos equipamentos não são mais que simples miniaturizações dos equipamentos convencionais.

Tabela 3.1: Características de máquinas de micro injecção

Equipamento		Características							
Marca	Modelo	Ø fuso (mm)	Relação L/d	Ø pistão (mm)	Pressão injecção (MPa)	Volume inj. (cm3)	Vel. Injecção Máx (Cm3/s)	Força fecho (Ton)	Altura mín. de molde (mm)
Battenfeld	microsystem 50	14	14	5	250	1.1	7.6	5.9	-
Ferromatik-									
Milacron	6/10P	-	-	10	265	4	6.2	6.3	-
Babyplast									
Rondol	High Force 5	20	-	-	160	4.75	12.5	5	80
Nissei	HM7 Type	-	-	-	175	6.2	-	7	110
Lawton	Nano-molder	-	-	-	-	0.35	-	-	-
Sumitomo	SE7M	14			196	6.2	46	7	110
Arburg	170U	15	4	-	220	10	26	12.5	150
Allrouder									
FANUC	S-2000i5A	14	-	-	200	6	46	5	220
ROBOSHOT									
JMW (Juken									
Machine	015S-5t	16	-	-	133	5	98	10	100
Works)									
Dr. Boy	12 A/M	12	-	-	-	4.5	-	-	129

Battenfeld microsystem 50

A Battenfeld tem vindo a trabalhar em micro injecção desde 1891, contudo a constante miniaturização dos componentes plásticos levou ao desenvolvimento de um conceito diferente de micro fabricação. O novo equipamento devia não só produzir micro componentes, como garantir o seu manuseamento, montagem e controlo de qualidade. Em 1997 começou o projecto da Battenfeld microsystem 50.

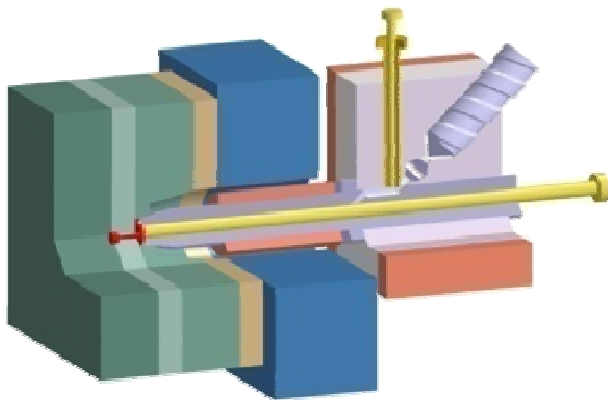


Figura 3.2: Battenfeld microsystem 50 – unidade de
injecção
(Cortesia Battenfeld GmbH)

A Battenfeld microsystem 50 é composta por vários módulos. O módulo de injecção (Figura 3.2) é composto por um fuso, uma válvula anti-retorno, um pistão de controlo, uma pistão de injecção e por uma unidade de aquecimento. Esta unidade permite injecções entre 0.025g e 1g, permitindo a redução do gito e do tempo de ciclo. Este módulo concede ao equipamento uma elevada precisão de injecção ($<1\text{mg}$) e permite a perpendicularidade do pistão de injecção face à linha de junta do molde.

Ferromatik-Milacron /Cronoplast Babyplast

Tendo em conta a especificidade deste equipamento e os custos associados na obtenção do mesmo, a aquisição de uma Babyplast pode ser uma solução mais viável que uma Battenfeld. A Babyplast 6/10P é um equipamento bastante compacto. Apesar da unidade de injecção não ser tão evoluída como a da Battenfeld a dosagem do material é relativamente precisa, pois também é executada por um cilindro. Este equipamento tem como grande vantagem o seu reduzido custo, quer de investimento inicial quer de produção. A Babyplast 6/10VP é um modelo vertical do modelo 6/10P. O modelo vertical permite mais facilmente injectar peças plásticas com insertos.

Rondol High Force 5

A Rondol High Force 5 é um equipamento de micro injecção de dimensões compactas. A grande distinção deste equipamento para a Babyplast consiste na unidade de injecção. Na Rondol a unidade não é composta por um sistema fuso/pistão ou pistão/pistão mas apenas por um que plasticiza e doseia o material.

Nissei

A Nissei Plastic Industrial Company disponibiliza no mercado 4 equipamentos de micro injecção:

Nissei HM7 Type b: O sistema de fecho deste modelo actua por pressão directa, aumentando a precisão do processo por um período de tempo superior e permite que o injectador se ajuste à posição do molde.

Nissei EP5 Real Mini Type: O modelo EP5 tem uma elevada resposta de injecção (0.03s), diminuindo o tempo de ciclo e tem uma unidade de monitorização do molde por radiação infra-vermelha (IR).

Nissei NP7 Real Mini Type: Este modelo tem uma excelente relação preço Vs desempenho. À semelhança dos modelos anteriores a Nissei tem um sistema de fecho por actuação directa e uma unidade de monitorização por IR.

Nissei NEX10 Type séries: A unidade de injecção deste modelo permite várias adaptações, dependendo da ferramenta utilizada. A Nissei NEX15 tem maior força de fecho e pressão de injecção.

Lawton Nano-molder

A Lawton Nano-molder foi inicialmente concebida para produzir micro componentes para a indústria médica. Devido à sua elevada precisão, esta vem sendo utilizada na injecção de vários tipos de micro componentes.

Sumitomo SE7M

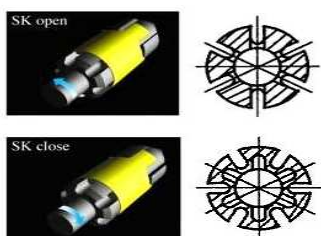


Figura 3.3: Sumitomo – sistema SK
(Cortesia Sumitomo Plastics Machinery)

A Sumitomo Plastics Machinery desenvolveu a Sumitomo SE7M e o sistema SK (Figura 3.3). Este sistema tem como função controlar o processo de injecção. Durante a plasticização o sistema encontra-se aberto permitindo o escoamento do material. Quando a cavidade enche por completo o sistema SK fecha-se, evitando o retorno do fluxo.

Este sistema torna o processo de injeccção mais estável e previne, assim, eventuais defeitos na peça.

Arburg Allrouder 170U

A Arburg Allrounder 170U é uma miniaturização das máquinas de injeccção convencionais. O doseamento do material a injectar é efectuado por um fuso, tal como na maioria dos equipamentos convencionais.

FANUC ROBOSHOT S-2000i5A

A FANUC ROBOSHOT S-2000i5A contém um servo-sistema que permite controlar a injeccção. A dosagem e a plasticização do material efectuem-se com o recurso a um fuso. Este sistema tem um elevado controlo de temperatura, pelo que detecta variações de 0.2°C.

JMW (Juken Machine Works)

A Juken Machine Works possui três equipamentos de micro injeccção, que têm a particularidade de serem todos verticais. As características que os distinguem entre si são, essencialmente, a força de fecho, o diâmetro do fuso e a capacidade de injeccção.

Dr. Boy 12 A/M

O sistema de injeccção da Dr. Boy 12 A/M é composto por um fuso (de diâmetro 12, 14 ou 18 mm) e não por um sistema pistão/fuso ou pistão/pistão.

3.4 Formulação matemática

Este sub-capítulo apresenta a formulação matemática do processo de injeccção de materiais termoplásticos.

A título exemplificativo, apresenta-se o processo de formulação e interpolação de um problema bidimensional (Becker *et al*, 1981).

Contabilizam-se, deste modo, algumas situações que não surgem no caso unidimensional, evitando-se ao mesmo tempo a complexidade acrescida dos problemas tridimensionais, sem que se verifique perda de informação, na medida em que a aproximação MEF

(Método de Elementos Finitos) de um problema tridimensional é uma extensão do problema bidimensional.

3.4.1 Regime estacionário

Considere-se o domínio físico Ω ilustrado na seguinte figura:

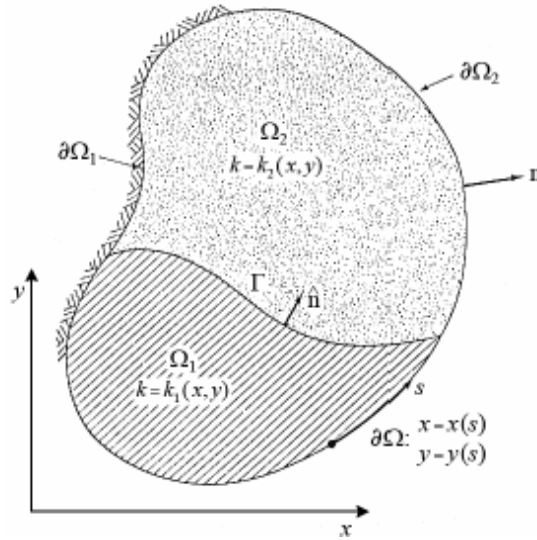


Figura 3.4: Domínio de um problema bidimensional (Becker *et al*, 1981)

O fenómeno físico a que está sujeito rege-se pela seguinte equação diferencial:

$$-\nabla[a(x, y)\nabla u(x, y)] + b(x, y)u(x, y) = f(x, y) \text{ para } (x, y) \in \Omega \quad (3.1)$$

Com condições de fronteira essenciais em $\partial\Omega_1$:

$$u(s) = \hat{u}(s) \text{ para } s(x, y) \in \partial\Omega_1 \quad (3.2)$$

Com condições de fronteira naturais em $\partial\Omega_2$:

$$\left. \begin{array}{l} q_n = -a(s)\nabla u(s)n = c(s)[u(s) - \hat{u}(s)] \\ \text{ou} \\ q_n = -a(s)\nabla u(s)n = \hat{q}(s) \end{array} \right\} \text{ para } s(x, y) \in \partial\Omega_2 \quad (3.3)$$

Com condições de salto na interface Γ :

$$q_n = -a(s)\nabla u(s)n = 0 \text{ para } s(x, y) \in \Gamma \quad (3.4)$$

A expressão anterior assume a inexistência de fontes distribuídas ou concentradas em Γ , situação esta, em que toma a forma:

$$q_n = a(s)\nabla u(s)n = \hat{f}_1 + \hat{f}_2(x - x_i, y - y_i) \text{ para } a(x, y)e(x_i, y_i) \in T \quad (3.5)$$

\hat{f}_1 representa a fonte distribuída em Γ_1 e \hat{f}_2 a fonte concentrada em $(x, y) = (x_i, y_i)$

Procedendo à discretização do MEF do domínio, obtém-se:

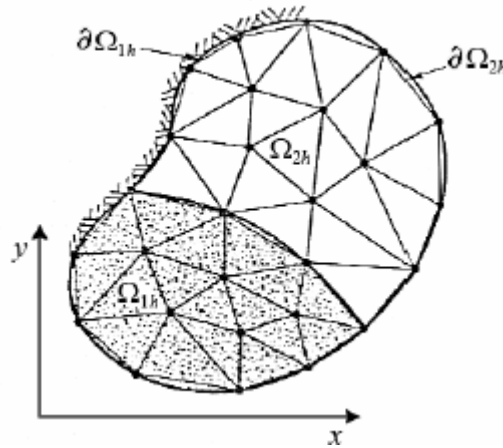


Figura 3.5: Discretização de elementos finitos do problema modelo (Becker *et al*, 1981)

Aproximando a solução $u(x, y)$ por uma combinação de funções interpoladoras (polinómios de Lagrange), segundo o método de Galerkin, obtém-se para cada elemento:

$$k^e u^e = f^e + q^e \quad (3.6)$$

Correspondendo a N_e equações algébricas:

$$\sum_{j=1}^{N_e} k_{ij}^e u_j^e = f_i^e + q_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, N_e \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} k_{ij}^e = \int_{\Omega^e} a(x, y) \nabla \Phi_j^e(x, y) + b(x, y) \Phi_j^e(x, y) \Phi_j^e(x, y) dx dy \\ f_{ij}^e = \int_{\Omega^e} f(x, y) \Phi_j^e(x, y) dx dy \\ q_{ij}^e = \oint_{\partial\Omega^e} q_n(s) \Phi_j^e(s) ds \end{cases} \quad (3.8)$$

A expressão 3.7 também se pode representar segundo:

$$\sum_{j=1}^{N_e} k_{ij}^e u_j^e = f_i^e + q_i^{(0)e} + q_i^{(1)e} + q_i^{(2)e}, \quad i = 1, 2, \dots, N_e \quad (3.9)$$

Com a seguinte interpolação:

- $q_i^{(0)e}$ é o termo correspondente às fronteiras do elemento sujeitas a condições de salto $(\partial\Omega^e - \partial\Omega_1^e - \partial\Omega_2^e)$; regra geral, corresponde a 3.4.
- $q_i^{(1)e}$ é o termo correspondente às fronteiras do elemento sujeitas a condições de fronteira essenciais $(\partial\Omega_1^e)$; é determinado no pós-processamento.
- $q_i^{(0)e}$ é o termo correspondente às fronteiras do elemento sujeitas a condições de fronteira naturais $(\partial\Omega_1^e)$; nesta situação $q_n(s) = c(s)[u(s) - \hat{u}(s)] = c(s)u(s) - \gamma(s)$

Desta forma, a expressão 3.1 deriva em:

$$\sum_{j=1}^{N_e} (k_{ij}^e + c_{ij}^e) u_j^e = f_i^e + \gamma_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, N_e \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{ij}^e = \int_{\Omega^e} a(x, y) \nabla \Phi_j^e(x, y) \Phi_i^e(x, y) + b(x, y) \Phi_j^e(x, y) \Phi_i^e(x, y) dx dy \\ f_i^e = \int_{\Omega^e} f(x, y) \Phi_i^e(x, y) dx dy \\ c_{ij}^e = \oint_{\partial\Omega^e} c(s) \Phi_i^e(s) \Phi_j^e(s) ds \\ \gamma_i^e = \int_{\partial\Omega_2^e} \gamma(s) \Phi_i^e(s) ds \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Após expansão e montagem dos E conjuntos matriciais 3.4 (correspondentes a cada elemento), obtém-se o sistema global de equações algébricas que fornece a solução $u(x, y)$:

$$Ku = F \quad (3.12)$$

Ou seja

$$\sum_{j=1}^N k_{ij}^e u_j^e = F_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.13)$$

Em que:

$$\begin{cases} K_{ij}^e = \sum_{e=1}^E (K_{ij}^e + C_{ij}^e) \\ F_i^e = \sum_{e=1}^E (F_i^e + \gamma_i^e) \end{cases} \quad (3.14)$$

As soluções obtidas são:

$$\begin{cases} u(x, y) \approx \sum_{j=1}^N u_j^e \Phi_j^e(x, y) \\ \frac{du(x, y)}{dx} \approx \sum_{j=1}^N u_j^e \frac{d\Phi_j^e(x, y)}{dx} \\ \frac{du(x, y)}{dy} \approx \sum_{j=1}^N u_j^e \frac{d\Phi_j^e(x, y)}{dy} \end{cases} \quad (3.15)$$

3.4.2 Regime transiente

Se o fenómeno a analisar não for estacionário, o que é uma situação vulgar no quotidiano, a solução é encontrada passando por diversas iterações temporais com incrementos Δt , em que é determinada uma aproximação espacial do problema. Obtém-se, portanto, uma distribuição espacial e temporal das variáveis primárias e secundárias.

3.4.2.1 Equações parabólicas

Estas equações descrevem processos de difusão, como a condução de calor. A equação diferencial parabólica (de 1ª ordem em relação ao tempo) é:

$$-\nabla[a\nabla u(x, y, t)] + bu(x, y, t) + c \frac{\partial u}{\partial t} = f(x, y, t) \quad (3.15a)$$

Com condições de fronteira:

$$u(x, y, t) \quad \text{ou} \quad q_n = -a\nabla u(x, y, t)n \quad (3.16)$$

Com condição inicial:

$$u(x, y, 0) \quad (3.17)$$

A aproximação da variação espacial do problema resume-se à forma:

$$M^e u^e + K^e u^e = F^e \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} M_{ij}^e = \int_{\Omega^e} c \Phi_j^e(x, y) \Phi_j^e(x, y) dx dy \\ K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} a \nabla \Phi_j^e(x, y) \nabla \Phi_j^e(x, y) + b \Phi_j^e(x, y) \Phi_j^e(x, y) dx dy \\ F_i^e = \int_{\Omega^e} f(x, y, t) \Phi_j^e(x, y) dx dy + \oint_{\partial \Omega^e} q_n(s) \Phi_j^e(s) ds \end{cases} \quad (3.19)$$

Sendo M a matriz de massas, K a matriz de coeficientes e F o vector fonte.

A aproximação temporal conduz a:

$$(M + \alpha \Delta t_{s+1} k_{s+1}) u_{s+1} = (M - (1 - \alpha) \Delta t_{s+1} K_s) u_s + \Delta t_{s+a} (\alpha F_{s+1} + (1 - \alpha) F_s) \quad (3.20)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0, \text{Euler progressivo (condicionalmente estável; exactidão } O(\Delta t)) \\ \frac{1}{2}, \text{Crank - Nicolson (estável; exactidão } O(\Delta t)^2) \\ \frac{2}{3}, \text{Galerkin (estável; exactidão } O(\Delta t)^2) \\ 1, \text{Euler regressivo (estável; exactidão } O(\Delta t)) \end{cases} \quad (3.21)$$

No método de Euler progressivo a condição de estabilidade é:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{crítico}} = \frac{2}{(1 - 2\alpha) \lambda_{\text{máx}}} \quad (3.22)$$

Sendo $\lambda_{\text{máx}}$ o maior valor próprio das equações de elementos finitos 3.15.

3.4.2.2 Equações hiperbólicas

Estas equações descrevem fenómenos de propagação de ondas. A equação diferencial de 2ª ordem em relação ao tempo é:

$$-\nabla[a\nabla u(x, y, t)] + bu(x, y, t) + c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(x, y, t) \quad (3.23)$$

Com condições de fronteira:

$$u(x, y, t) \text{ ou } q_n = -a\nabla u(x, y, t)n \quad (3.24)$$

e condições iniciais:

$$u(x, y, 0) \text{ e } \frac{\partial u}{\partial t} = (x, y, 0) \quad (3.25)$$

A aproximação da variação espacial do problema resume-se à forma:

$$M^e u^e + K^e u^e = F^e \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} M_{ij}^e &= \int_{\Omega^e} c \Phi_j^e(x, y) \Phi_i^e(x, y) dx dy \\ K_{ij}^e &= \int_{\Omega^e} a \nabla \Phi_j^e(x, y) \nabla \Phi_i^e(x, y) + b \Phi_j^e(x, y) \Phi_i^e(x, y) dx dy \\ F_i^e &= \int_{\Omega^e} f(x, y, t) \Phi_i^e(x, y) dx dy + \oint_{\partial\Omega^e} q_n(s) \Phi_i^e(s) ds \end{aligned} \quad (3.27)$$

Sendo M a matriz de massas, K a matriz de coeficientes e F o vector fonte.

A aproximação temporal, fundamentada no método de Newmark, conduz a:

$$\left(K_{s+1} + \frac{2}{\gamma(\Delta t)^2} M_{s+1} \right) u_{s+1} = M_{s+1} \left(\frac{2}{\gamma(\Delta t)^2} u_s + \frac{2}{\gamma(\Delta t)^2} \dot{u}_s + \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \ddot{u}_s \right) + F_{s+1} \quad (3.28)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2}, \gamma = \frac{1}{2}, \text{ Método da aceleração constante média (estável)} \\ \alpha = \frac{1}{2}, \gamma = \frac{1}{3}, \text{ Método da aceleração linear (condicionalmente estável)} \\ \alpha = \frac{1}{2}, \gamma = 0, \text{ Método das diferenças centrais (condicionalmente estável)} \end{cases} \quad (3.29)$$

a condição de estabilidade é:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{crítico}} = \frac{1}{2} \omega_{\text{máx}}^2 (\alpha - \gamma)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

Sendo $\omega_{\text{máx}}^2$ o maior valor próprio das equações de elementos finitos 3.19.

3.4.3 *Reologia*

O termo reologia vem do verbo grego $\rho\epsilon\iota\upsilon$, escoar. Esta ciência estuda as relações fundamentais, chamadas de relações constitutivas, entre força e deformação (Macosko, 1993). Na década de 20 Eugene Cook Bingham definiu reologia como o estudo da deformação e fluxo da matéria.

As equações constitutivas relacionam várias propriedades como: elasticidade, viscosidade e viscoelasticidade. A viscosidade é uma medida de resistência interna ao fluxo, sendo que maior viscosidade de uma massa implica maior resistência ao escoamento da mesma. Os fluidos viscosos não apresentam forma definida, escoam continuamente e deformam-se permanentemente quando sujeitos a forças externas.

A elasticidade é a capacidade que o material tem de recuperar de uma determinada deformação provocada por uma força. Os materiais elásticos, quando não sujeitos a nenhuma força, apresentam uma determinada forma muito específica, quando sujeitos a uma carga constante apresentam outra forma, também esta bem definida.

Os materiais com propriedades viscoelásticas apresentam comportamentos mecânicos intermédios entre os materiais viscosos e os elásticos. A Figura 3.6 apresenta uma classificação dos fluidos.

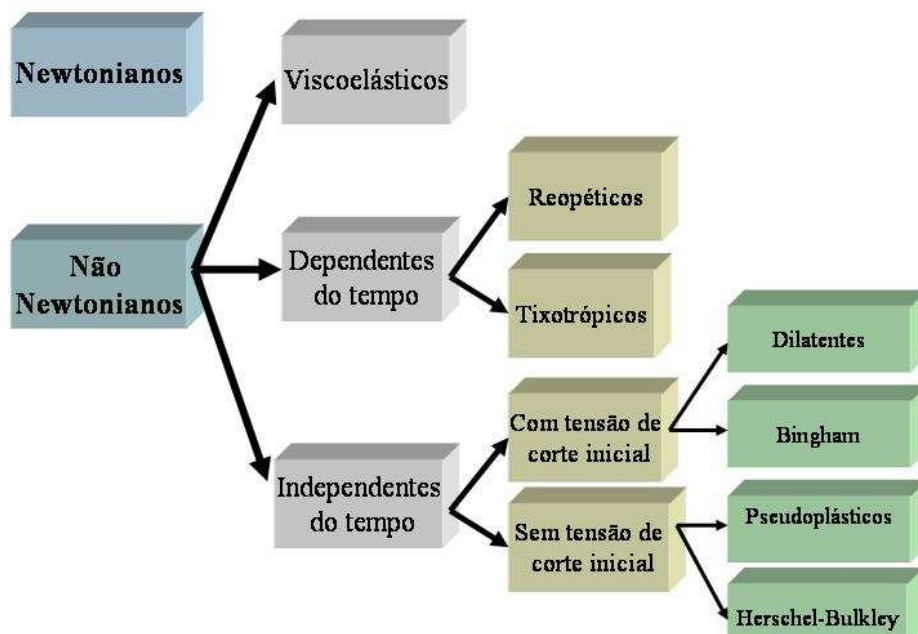


Figura 3.6: Classificação de fluidos

As simulações reológicas desta dissertação são elaboradas no *Moldflow Plastics Insight®*, assim é importante analisar a forma como o *software* processa estes materiais. De uma forma geral, são assumidas nas análises do *Moldflow Plastics Insight®* duas simplificações principais, que são os conceitos de fluido Newtoniano generalizado e de temperatura de fluxo nulo.

Os fluidos Newtonianos apresentam viscosidade constante a uma dada temperatura. Os polímeros fundidos são fluidos não-Newtonianos, apresentando comportamento viscoelástico. No entanto, o actual estado-da-arte não permite contabilizar estes efeitos, considerando-se apenas a viscosidade dependente não só da temperatura como também da taxa de deformação (fluido Newtoniano generalizado).

A temperatura de fluxo nulo é definida como a temperatura à qual o material suspende o seu fluxo. Apesar de não ser uma propriedade física fundamental, é um conceito bastante útil na modelação da camada sólida que se deposita nas paredes. A imprecisão do valor que lhe é atribuído, beneficia do seu enquadramento em gamas de temperaturas onde o perfil de temperatura varia rapidamente, pelo que a dimensão efectiva da secção, e logo, as pressões calculadas são relativamente insensíveis à variação do seu valor.

As equações diferenciais gerais que estabelecem o comportamento de um fluido em injecção de plásticos, demonstradas em Kennedy (1995), são:

Conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (3.31)$$

Conservação de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) = \rho g + (\nabla \sigma) - (\nabla \rho v v) \quad (3.32)$$

Conservação de energia:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \nabla p \right) + p \nabla v + (\sigma : \{\nabla v\}) - \nabla(k \nabla T) \quad (3.33)$$

$$C_p = \frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_p \quad e \quad \beta = \frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_p \quad (3.34)$$

Em que ρ designa a densidade, c_p o calor específico a pressão constante, β o coeficiente de expansão volúmica, k a condutibilidade térmica do fundido, v o vector velocidade, g o vector das forças volúmicas (de gravidade), σ o tensor das tensões, T e P são, respectivamente, a temperatura e pressão do elemento fundido.

3.4.4 Modelo matemático

Em termos de simulação matemática do processo de injecção de termoplásticos consideram-se duas etapas distintas: o enchimento (*filling*) e a pressurização (*packing*). O arrefecimento (*cooling*) é incluído nesta última.

3.4.4.1 Fase de enchimento

As equações atrás apresentadas não são exequíveis, na medida em que exigem demasiada informação e recursos computacionais, pelo que são aplicados vários pressupostos com o objectivo de as simplificar:

1. O fundido é considerado incompressível;

2. O fundido é considerado um fluido Newtoniano generalizado;
3. Admite-se a condutibilidade térmica do material constante (na realidade depende da temperatura);
4. Utiliza-se o método designado por análise dimensional, técnica em que, após a atribuição de uma ordem de grandeza usual, a característica do processo de injecção substitui as variáveis das equações por variáveis adimensionais correspondentes, contendo os valores usuais das características processuais, e assim, permite atribuir a cada termo da equação uma ordem de grandeza. Deste modo, ignoram-se os termos que possuem uma ordem de grandeza suficientemente baixa, quando comparada com os de magnitude elevada;
5. A transferência de calor por convecção na direcção z (direcção de menor espessura) é desprezada (apesar de na frente do fluxo ser indiscutível a sua existência);
6. Assume-se a existência de uma camada solidificada constituída por material abaixo da temperatura de fluxo-nulo, na qual a velocidade é zero;
7. Assume-se a simetria do fluxo relativamente à linha central da cavidade.

Em simulações reológicas é também necessário contabilizar os processos verificados no sistema de gitos. Neste caso, as equações diferenciais também sofrem simplificações. Assim, além dos pontos 1 a 3 já apresentados, assume-se que:

1. A temperatura e o fluxo nos gitos são simétricos em relação ao eixo longitudinal (sendo a interface da camada sólida com o fundido, função de r e x);
2. A transferência de calor por convecção na direcção radial é desprezável (na verdade existe temporariamente na frente do fluxo).

Os pressupostos apresentados são assumidos sequencialmente, durante a manipulação matemática das equações gerais, após a qual são deduzidas as equações fundamentais que permitem efectuar uma análise de enchimento.

Nesta dissertação a simulação baseia-se na fase de enchimento. As seguintes equações fundamentais permitem efectuar uma análise desta fase e estão demonstradas em Kennedy (1995).

Equação da pressão na cavidade:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.35)$$

Equação da energia na cavidade:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma} + K \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (3.36)$$

Equação da pressão em gitos circulares:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.37)$$

Equação da energia em gitos circulares:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.37a)$$

Em que $S1$ e $S2$ designam a fluidez (a uma e duas dimensões, respectivamente), η a função viscosidade, $\dot{\gamma}$ a taxa de corte e r o valor de r na interface sólido-fundido.

As condições de fronteira a que as equações fundamentais estão sujeitas são:

A pressão é nula na frente do fundido:

$$P(\Sigma_{ff}) = 0 \quad (3.37b)$$

A pressão ou a taxa de fluxo nos pontos de injecção é especificada:

$$P(\Sigma_{inj}) = P_{inj} \text{ ou } q(\Sigma_{inj}) = q_{inj} \quad (3.38)$$

O gradiente normal de pressões é nulo nas fronteiras impermeáveis (paredes superior e inferior da cavidade, contorno em contacto com o fundido ou insertos):

$$\frac{\partial P}{\partial n} \left(\Sigma_{h^+}, \Sigma_{h^-}, \Sigma_{cf}, \Sigma_{ins} \right) = 0 \quad (3.39)$$

A temperatura nas paredes da cavidade é especificada:

$$T(\Sigma_{h^+}) = T_{h^+}, T(\Sigma_{h^-}) = T_{h^-}, T(\Sigma_{cf}) = T_{cf}, T(\Sigma_{ins}) = T_{ins} \quad (3.40)$$

O gradiente de temperatura na direcção z é nulo na linha central da cavidade:

$$\frac{\partial T}{\partial Z}(Z = 0) = 0 \quad (3.41)$$

A temperatura nos pontos de injecção é especificada:

$$T(\Sigma_{inj}) = T_{inj} \quad (3.42)$$

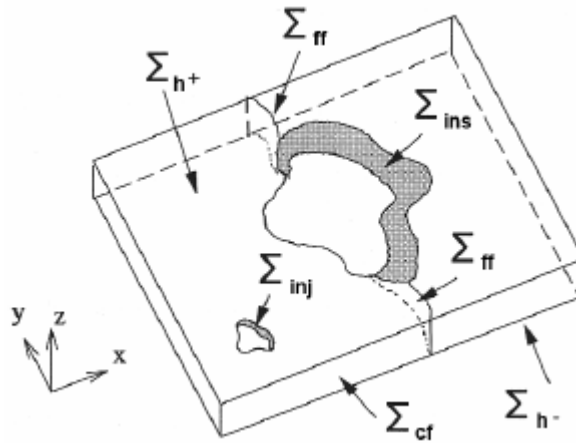


Figura 3.7: Condições de fronteira em simulação de enchimento (Becker *et al*, 1981)

O processo de resolução de um problema de enchimento cumpre as seguintes etapas:

1. Cálculo de S a partir da viscosidade à temperatura do fundido. Conhecido S , resolve-se a equação 3.35 para as condições de fronteira estipuladas, obtendo-se p . Depois de calculado o campo de pressões, determina-se v . A velocidade permite obter uma taxa de corte, que por sua vez, permite obter um novo valor de viscosidade. O cálculo é repetido até que, após várias iterações, a pressão p convirja;
2. Uma vez encontrados valores para \mathbf{v} , $\dot{\gamma}$ e η , os termos de convecção e viscosidade da equação 3.36 ficam determinados. Esta expressão, na prática, fica resumida a um problema de condução térmica. Obtido o campo de temperaturas T , o valor da

viscosidade pode ser actualizado e calculado o fluxo em cada volume de controlo da frente de fundido;

3. Conhecendo a taxa de fluxo em cada volume de controlo, pode-se prever quais destas serão preenchidas no incremento temporal seguinte e avançar a frente de fluxo apropriadamente;
4. Retornar à etapa 1, até que a cavidade do molde esteja preenchida. Efectuando a discretização do domínio e equações, própria do MEF, partindo das equações 3.35 e 3.37 deduzem-se as equações elementares, sob a seguinte forma matricial:

$$K^e P^e = Q^e \quad (3.42a)$$

Os elementos utilizados no *Moldflow Plastics Insight*® são triangulares sendo a solução em cada elemento:

$$p^{(e)}(x, y) \approx \sum_{i=1}^3 \xi_i(x, y) p_i \quad (3.43)$$

Em que (x, y) é a coordenada de área do nó i e p_i é o valor da pressão no nó i .

$$KP = Q \quad (3.44)$$

K é a matriz de coeficientes (“matriz de rigidez”), p o vector de pressões e Q o vector de fluxos (“vector carga”).

Uma vez determinado o campo de pressões, as temperaturas são obtidas com recurso ao método das diferenças finitas, o que, por outras palavras, significa que se procede a uma discretização do domínio e das equações, em que os termos destas sofrem uma aproximação por expansão em série de Taylor.

O *Moldflow Plastics Insight*® utiliza ambos os métodos explícito e implícito, de forma a atingir um compromisso entre rapidez e estabilidade da solução. O método explícito é bastante rápido, mas para garantir uma solução estável os incrementos de tempo devem ser reduzidos. Os procedimentos variam, dependendo do valor de M :

$$M = \frac{k\Delta t}{\rho C_p (\Delta z)} \quad (3.45)$$

- Se $M < 1/2$, utiliza-se o método explícito;
- Se $1/2 < M < 2$, realizam-se $M/0.5$ incrementos de tempo explícito;
- Se $2 < M < 10$, efectua-se um incremento de tempo implícito;
- Se $M > 10$, realizam-se $M/10$ incrementos de tempo implícito.

Sendo assim, a expressão 3.37 deriva nas seguintes equações, conforme o método utilizado:

Método das diferenças finitas explícito

$$T_i^{n+1} = M(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + T_i^n - (\Delta t) \left[V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right]_i^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p} [\eta \dot{\gamma}^2]_i^n \quad (3.46)$$

Método das diferenças finitas implícito

$$-MT_{i+1}^{n+1} + (1 + 2M)T_i^{n+1} - MT_{i-1}^{n+1} = T_i^n - (\Delta t) \left[V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right]_i^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p} [\eta \dot{\gamma}^2]_i^n \quad (3.47)$$

Esta última equação pode-se representar sob a seguinte forma matricial:

$$MT^{n+1} = b \quad (3.48)$$

Uma vez determinado o campo de pressões, pode-se calcular a taxa de fluxo em cada nó correspondente à frente do fluxo (equação 3.44). Como o incremento de tempo é conhecido, os nós são analisados para verificar se estão cheios. Se um nó foi preenchido, os nós adjacentes são incorporados na frente e são preenchidos os nós que possuem a maior taxa de fluxo.

3.4.4.2 Fase de compactação

Durante o período de pressurização são realizados cálculos de pressão e térmicos.

Nesta fase da injeção as equações fundamentais gerais continuam a não ser exequíveis, exactamente pelas mesmas razões: exigem demasiada informação e recursos computacionais.

Por conseguinte, são aplicados vários pressupostos com o objectivo de as simplificar. De facto, todos os pressupostos considerados na fase de enchimento são assumidos, com excepção da incompressibilidade do fundido.

Adicionalmente, assume-se que os termos da pressão relativos à convecção podem ser ignorados e, após alguma manipulação matemática durante a qual são aplicadas sequencialmente as simplificações correspondentes aos vários pressupostos, determinam-se as seguintes equações, apropriadas para a análise de pressurização. Estas equações demonstram-se em Kennedy (1995).

Equação da pressão na cavidade:

$$\bar{k}H \frac{\partial P}{\partial t} - \int_0^H \frac{\beta}{\rho C_p} \left(\eta \dot{\gamma}^2 + K \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) dZ - \frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.49)$$

Equação da energia na cavidade:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \beta T \frac{\partial T}{\partial x} + \eta \dot{\gamma}^2 + K \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (3.50)$$

Equação da pressão em gitos circulares:

$$\bar{K}_c R^2 \frac{\partial P}{\partial t} - 2 \int_0^R \frac{\beta}{\rho C_p} \left[\eta \dot{\gamma}^2 + \frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] r dr - \frac{\partial}{\partial x} \left(r^+ S_1 \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.51)$$

Equação da energia em gitos circulares:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \beta T \frac{\partial P}{\partial t} + \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.52)$$

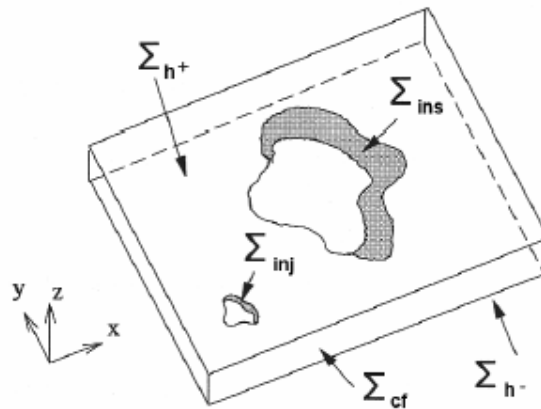


Figura 3.8: Condições de fronteira em simulação de pressurização (Becker *et al*, 1981)

O processo de pressurização apresenta uma variação temporal da pressão e da temperatura, como se pode observar nas equações 3.49 a 3.52.

Como o cálculo dos campos de pressão e temperatura para cada incremento de tempo iriam consumir excessivos recursos do computador, o *Moldflow Plastics Insight®* assume um período isotérmico, no qual se pode iterar várias vezes a pressão para reduzidos incrementos de tempo. Por defeito, o período de tempo é de 0.05s.

Assim, as diversas etapas da simulação de pressurização são:

1. Cálculo do campo de pressões relativo ao novo tempo t_{n+1} ;
2. Cálculo da variação da temperatura devido à compressão do material;
3. Cálculo da densidade e das suas derivadas relativamente à pressão e temperatura, utilizando informação PVT do material e os resultados de 1 e 2;
4. Actualização da viscosidade e a partir desta da fluidez;
5. Incremento de tempo;
6. Se o período isotérmico ainda não tiver sido atingido, regressar à 1ª etapa. Se o período isotérmico tiver expirado, prosseguir com as etapas seguintes;
7. Cálculo da variação da temperatura devido à compressão, convecção, dissipação e condução;
8. Actualização da viscosidade;
9. Cálculo da variação da pressão devido à variação de temperatura;
10. Cálculo da densidade utilizando informação PVT;
11. Aumento do incremento de tempo;
12. Se o período de pressurização tiver sido concluído, a simulação termina. Caso contrário, regressar à etapa 1.

Discretizar o domínio e as equações para elementos triangulares (análogamente ao processo de enchimento) para que a solução aproximada do problema seja:

$$p^{(e)}(x, y) \approx \sum_{i=1}^3 \xi_i(x, y) p_i \quad (3.53)$$

Em que ξ_i é a coordenada de área do nó i , e p_i é o valor da pressão no nó i .

As equações fundamentais 3.49 e 3.51 são transformadas em equações elementares, sob a seguinte forma matricial:

$$C^e P^e + K^e P^e = Q^e - B^e \quad (3.54)$$

As equações elementares 3.54, depois de suportarem uma transformação em coordenadas globais, são assembladas, conforme estabelecido pelo MEF, formando o seguinte sistema de equações globais:

$$C\dot{p} + Kp = Q - B \quad (3.55)$$

Aplicando o método das diferenças finitas, obtém-se:

$$(C + \Delta t K)p^{n+1} = Cp^n + \Delta t(Q - B) \quad (3.56)$$

Depois da aplicação das condições de fronteira adequadas, a resolução da equação 3.56 estabelece o campo de pressões p^{n+1} .

Na pressurização, a informação PVT é usada para determinar a densidade do material ρ , os coeficientes de compressibilidade isotérmica κ e de expansão volúmica β .

Conhecidas as propriedades ρ , β , e c_p pode-se prosseguir a análise com a determinação do aumento de temperatura devido à compressão (equações 3.49 e 3.51):

$$\Delta T_{comp}^{n+1} = \frac{\beta T^n}{\rho C_p} (p^{n+1} - p^n) \quad (3.57)$$

Baseados nesta variação de temperatura e com o auxílio de informação PVT, são estabelecidos novos valores de densidade, coeficiente de compressibilidade isotérmica, coeficiente de expansão volúmica e, consequentemente, determinados novos valores para

as derivadas: $\frac{\partial \rho}{\partial p}$ e $\frac{\partial \rho}{\partial T}$. Destes valores pode-se encontrar $\frac{\partial p}{\partial t}$ o que, juntamente com os novos valores de compressibilidade, permite concretizar C^e .

O aumento da temperatura também é empregue na actualização do valor da viscosidade. Para que isto se verifique é necessária a taxa de corte correspondente à pressão p^{n+1} .

Conhecendo a viscosidade, determina-se a fluidez S e portanto, pode-se actualizar K^e .

Se o incremento de tempo ainda permanecer no período isotérmico, é calculado um novo campo de pressões com a equação 3.56 actualizada e volta-se a percorrer as várias etapas acabadas de descrever.

Se for o momento de iniciar um novo período isotérmico, a equação de energia 3.56 é resolvida para o campo de temperaturas.

O processo aplica o método das diferenças finitas exactamente como na fase de enchimento, exceptuando o facto de, neste caso, existir um termo fonte adicional relativo aos efeitos de compressão. Este é equivalente ao somatório das várias variações de temperatura sofridas no período isotérmico anterior.

Ou seja:

Método das diferenças finitas explícito

$$T_i^{n+1} = M(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + T_i^n - (\Delta t) \left[V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right]_i^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p} [\eta \dot{\gamma}^2]_i^n + \sum \Delta T_{i,comp}^n \quad (3.58)$$

Método das diferenças finitas implícito

$$-MT_{i+1}^{n+1} + (1+2M)T_i^{n+1} - MT_{i-1}^{n+1} = T_i^n - (\Delta t) \left[V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right]_i^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p} [\eta \dot{\gamma}^2]_i^n + \sum \Delta T_{i,comp}^n \quad (3.59)$$

As condições de aplicabilidade de cada expressão são exactamente as mesmas já descritas aquando da fase de enchimento.

Uma vez calculado o campo de temperaturas, a viscosidade e logo a fluidez são recalculadas. Através de informação PVT são determinados novos valores de densidade, coeficiente de compressibilidade isotérmica, coeficiente de expansão volúmica e logo de $\frac{\partial \rho}{\partial p}$ e $\frac{\partial \rho}{\partial T}$.

Novas matrizes C^e e K^e podem ser constituídas a partir das novas características.

Um novo incremento do tempo é aplicado e passa-se ao novo período isotérmico, em que o campo de pressões é calculado através do sistema matricial 3.56. Verifica-se um novo ciclo de iterações de campos de pressões, como exposto atrás.

Depois de finalizado o período de pressurização, inicia-se o período de arrefecimento. Durante este período são executados apenas cálculos térmicos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, recorrendo ao *software Moldflow Plastics Insight®*, é elaborada a análise experimental. Numa primeira etapa recorre-se a uma micro peça utilizada nos estudos de Shen *et al* (2004), com o objectivo de comparar alguns resultados. Na fase seguinte é modelada uma micro peça na qual, à semelhança da anterior, se elaboram simulações de enchimento.

4.1 Estudo comparativo

O artigo em estudo tem como principal objectivo verificar os parâmetros que mais influenciam o enchimento da peça apresentada na Figura 4.1. Paralelamente a este estudo é executada uma comparação entre o método extensivo e o método 3D. Nesta dissertação a referida comparação não é alvo de estudo, contudo, as conclusões obtidas no artigo sobre a importância de cada parâmetro serão alvo de análise e comparação.

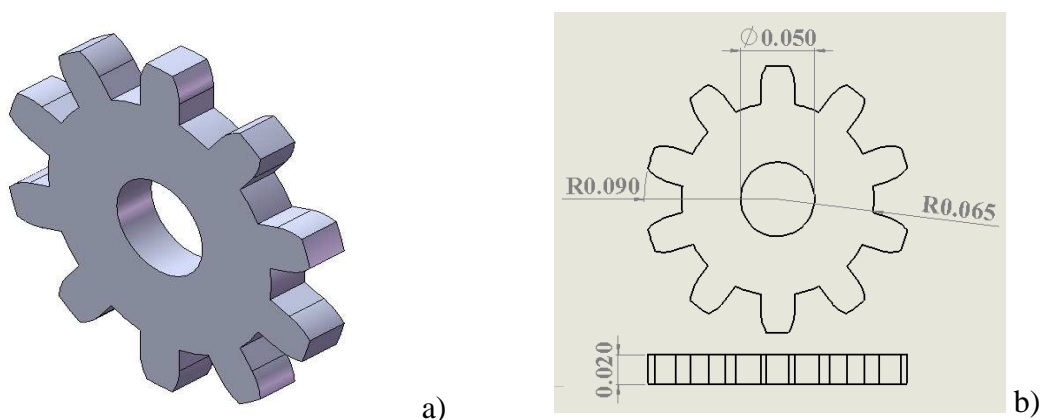


Figura 4.1: a) vista 3D da peça; b) dimensões da peça utilizada no estudo comparativo

Neste estudo, o objectivo consiste em minimizar o valor de pressão requerida. Deste modo considera-se que mais importante é o parâmetro quanto maior a sua influência na minimização da pressão requerida. No processo de injecção existem vários parâmetros com influência na pressão de injecção, contudo, para tornar o estudo exequível apenas serão alvo de análise os mais relevantes: temperatura de injecção; temperatura do molde; tempo de injecção e ponto de comutação com 3 níveis cada.

Um conjunto de experiências de 4 parâmetros com 3 níveis implica um conjunto de 81 experiências (3^4). Para tornar o plano de experiências exequível é elaborada uma matriz de Taguchi. Para este caso opta-se por uma matriz L_9 (3^4) apresentada na Tabela 4.1. Durante este capítulo é explicada cada etapa do método Taguchi.

Tabela 4.1: Matriz L_9 de Taguchi

	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

O artigo em estudo analisa 3 materiais: Poliacetal (POM), Polipropileno (PP) e Poliamida (PA). Os materiais escolhidos neste estudo são os apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características dos materiais utilizados no estudo comparativo

Material	POM	PP	PA
Fabricante	Ticona (Europe)	SABIC Europe B.V.	DuPont Engineering Polymers
Nome comercial	Hostaform C 13021	SABIC PP 571P	Zytel 330
Estrutura	Cristalino	Cristalino	Cristalino
T^omáxima de injecção	240	300	360
T^o injecção recomendada	180-220	200-240	260-320
T^o molde recomendada	60-120	20-45	70-110
T^o extracção recomendada	150	50	160

No método de Taguchi a etapa mais decisiva para o sucesso final consiste na forma como se organiza todo o plano de experiências. Depois de definidos os parâmetros importantes e o tipo de matriz procede-se à elaboração da matriz de experiências (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Matriz de experiências

	Nível	T° injecção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)
POM	1	170	160	0.1	99
	2	185	165	0.6	99.5
	3	200	170	1.1	99.9
PP	1	210	185	0.1	99
	2	230	190	0.6	99.5
	3	250	195	1.1	99.9
PA	1	325	315	0.1	99
	2	340	320	0.6	99.5
	3	355	325	1.1	99.9

Nos *softwares* de elementos finitos, após a importação da peça, a primeira operação consiste na elaboração da malha. O *Moldflow Plastics Insight®* permite três tipos de malha: *Fusion*, *Mid-plane* e *Solid*. Na primeira hipótese a malha é composta por elementos triangulares que formam uma casca. Na forma *Mid-plane* a malha é construída a partir de uma superfície intermédia entre a superfície exterior e a linha média da peça. A malha *Solid* é composta por elementos sólidos – piramidais. Esta solução é a que permite obter melhor resultado, uma vez que não ignora o núcleo sólido da peça, contudo o processador é mais sobrecarregado. Devido às reduzidas dimensões dos componentes a estudar nesta dissertação, todas as malhas são do tipo *Solid*.

Existem algumas condições de processamento que, não obstante a sua menor importância, não devem ser desprezadas. O material definido para o molde é um Tool steel P-20 (Tabela 4.4). A máquina definida no *software* é uma Arburg Allrounder 220 S 17. Tem um fuso de 15mm de diâmetro e uma força de fecho máxima de 154 KN.

Tabela 4.4: Características do material definido para o molde

Densidade	7.8	[g/Cm ³]
Calor específico	460	[J/Kg.°C]
Condutividade térmica	29	[W/m.°C]
Coeficiente dilatação térmica	1.2 ⁻⁵	[1/°C]

As forças de fecho requeridas na micro injecção são incomparavelmente mais reduzidas que no processo convencional. A Figura 4.2 apresenta a força de fecho requerida na análise nº 8 em POM. Esta análise, das 33 análises do estudo comparativo, é a que requer maior força de fecho.

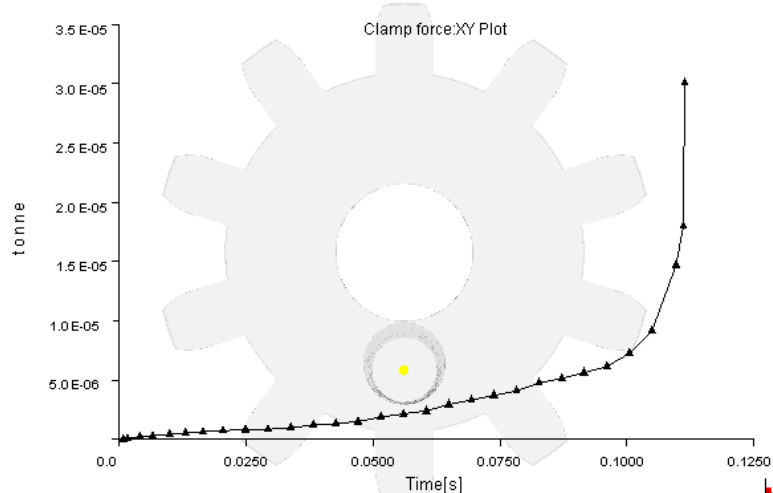


Figura 4.2: Força de fecho da análise nº 8 em POM

Depois de substituídos os valores da Tabela 4.3 na Tabela 4.1 obtém-se a matriz de Taguchi. A esta acrescentam as colunas dos resultados para cada experiência. As Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados das análises em POM, PP e PA, respectivamente. Na última linha de cada tabela encontram-se os valores do parâmetro \bar{T} (soma das médias) que será utilizado num passo posterior à aplicação do método de Taguchi. Este valor consiste na média aritmética dos valores obtidos.

Tabela 4.5: Matriz de Taguchi com os resultados para POM (estudo comparativo)

POM					
Experiência Nº	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. injecção (MPa)
1	170	160	0.1	99	26.3
2	170	165	0.6	99.5	11.34
3	170	170	1.1	99.9	7.417
4	185	160	0.6	99.9	12.34
5	185	165	1.1	99	7.405
6	185	170	0.1	99.5	25.05
7	200	160	1.1	99.5	8.193
8	200	165	0.1	99.9	26.62
9	200	170	0.6	99	10.22
				\bar{T}	14.987

A pressão de injeção no final de enchimento da análise nº 5 em PP, visível na Figura 4.3, fica-se pelos 4.35 MPa, sendo a mais baixa para este material.

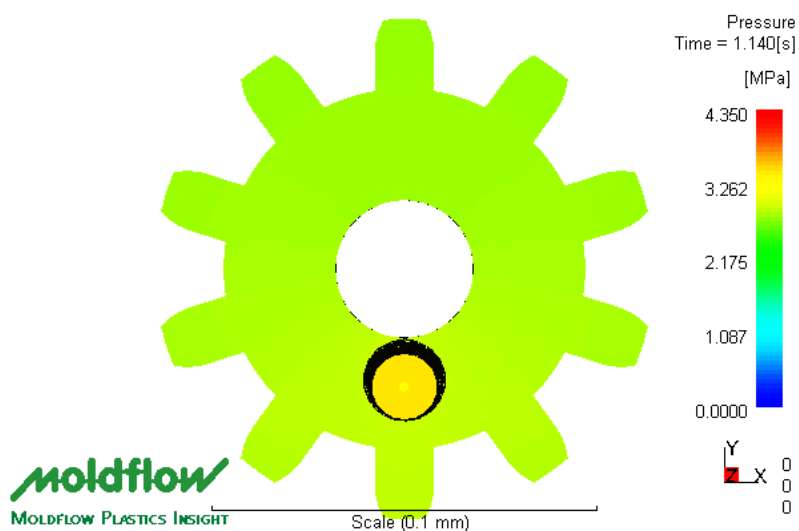


Figura 4.3: Pressão de enchimento da análise nº 5 em PP

Tabela 4.6: Matriz de Taguchi com os resultados para PP (estudo comparativo)

PP					
Experiência Nº	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. de injecção (MPa)
1	210	185	0.1	99	10.39
2	210	190	0.6	99.5	5.57
3	210	195	1.1	99.9	4.343
4	230	185	0.6	99.9	5.94
5	230	190	1.1	99	4.35
6	230	195	0.1	99.5	9.815
7	250	185	1.1	99.5	4.687
8	250	190	0.1	99.9	10.15
9	250	195	0.6	99	5.143
				\bar{T}	6.710

A Figura 4.4 mostra a pressão requerida na análise nº 8. As regiões opostas ao ponto de injecção são, obviamente, as últimas e as que têm mais dificuldade a encher. Estas zonas poderão, na fase de industrialização, sofrer problemas, nomeadamente falta de enchimento, linhas de soldadura ou prisões de gases. De todas as análises deste estudo, a análise nº 8 em PA é a que apresenta menor pressão de injecção necessária.

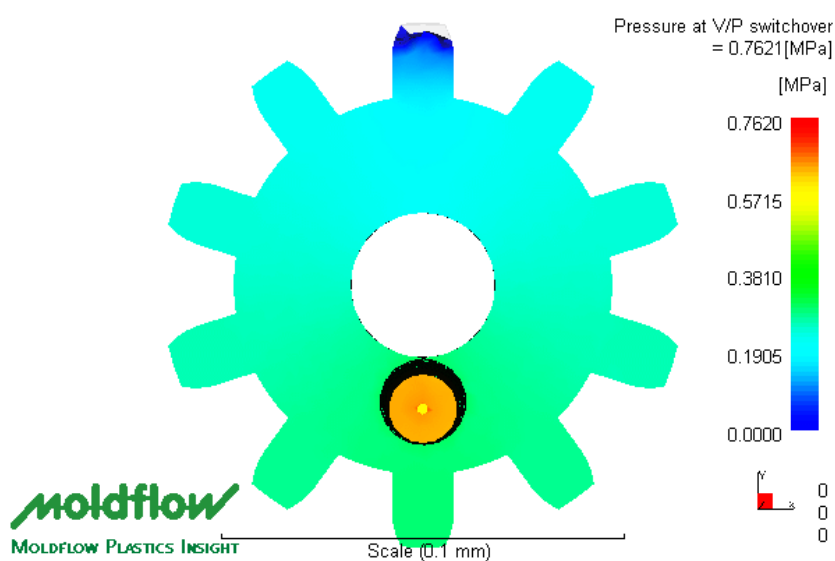


Figura 4.4: Pressão na comutação da análise nº 8 em PA

Tabela 4.7: Matriz de Taguchi com os resultados para PA (estudo comparativo)

PA					
Experiência Nº	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. de injecção (MPa)
1	325	315	0.1	99	7.972
2	325	320	0.6	99.5	1.602
3	325	325	1.1	99.9	0.837
4	340	315	0.6	99.9	1.841
5	340	320	1.1	99	0.8632
6	340	325	0.1	99.5	6.395
7	355	315	1.1	99.5	0.7621
8	355	320	0.1	99.9	7.05
9	355	325	0.6	99	1.284
				\bar{T}	3.178

Para cada nível é calculada a média dos valores obtidos (Tabela 4.8 à Tabela 4.10). Visto que o objectivo consiste em minimizar os valores de pressão, os parâmetros mais importantes são os que têm a maior diferença entre o valor menor e o maior. Esses valores encontram-se destacados nas tabelas referidas.

Tabela 4.8: Média de cada nível por parâmetro para POM (estudo comparativo)

POM				
	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	15.019	15.611	25.990	14.642
Nível 2	14.932	15.122	16.767	14.861
Nível 3	15.011	14.229	7.672	15.459
Diferença	-0.087	-1.3820	-18.318	-0.817

Tabela 4.9: Média de cada nível por parâmetro para PP (estudo comparativo)

PP				
	T° injecção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	6.768	7.006	10.118	6.628
Nível 2	6.702	6.690	5.551	6.691
Nível 3	6.660	6.434	4.460	6.811
Diferença	-0.108	-0.572	-5.658	-0.183

Tabela 4.10: Média de cada nível por parâmetro para PA (estudo comparativo)

PA				
	T° injecção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	3.470	3.525	7.139	3.373
Nível 2	3.033	3.172	1.576	2.920
Nível 3	3.032	2.839	0.821	3.243
Diferença	-0.437	-0.6864	-6.318	-0.453

Analisando as tabelas anteriores verifica-se que o tempo de injecção, em primeiro plano e a temperatura do molde, em segundo, são os parâmetros de injecção mais importantes.

Apesar de as tabelas anteriores mostrarem os parâmetros mais importantes, a visualização da variação dos resultados vista sob forma de gráfica ilustra de forma mais clara a sua relevância. Estas variações são perceptíveis nas gráficas lineares (GL) da Figura 4.5 à Figura 4.7.

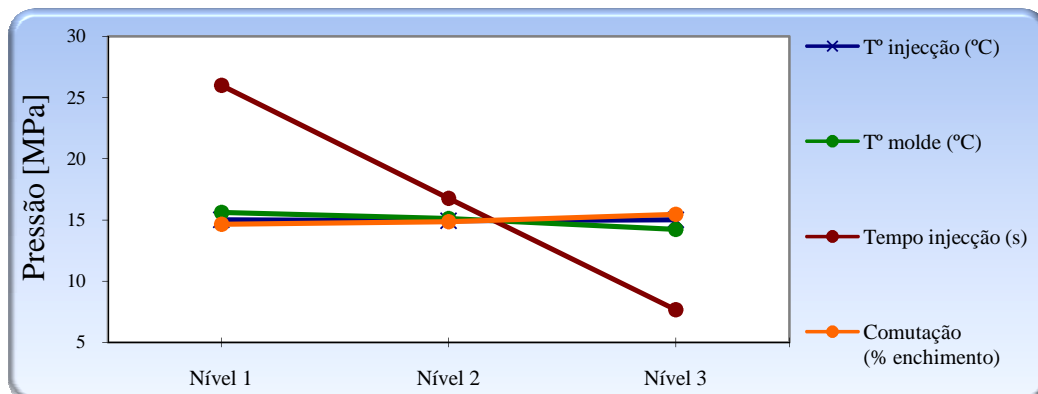


Figura 4.5: Gráfica linear para variação de pressão em POM (estudo comparativo)

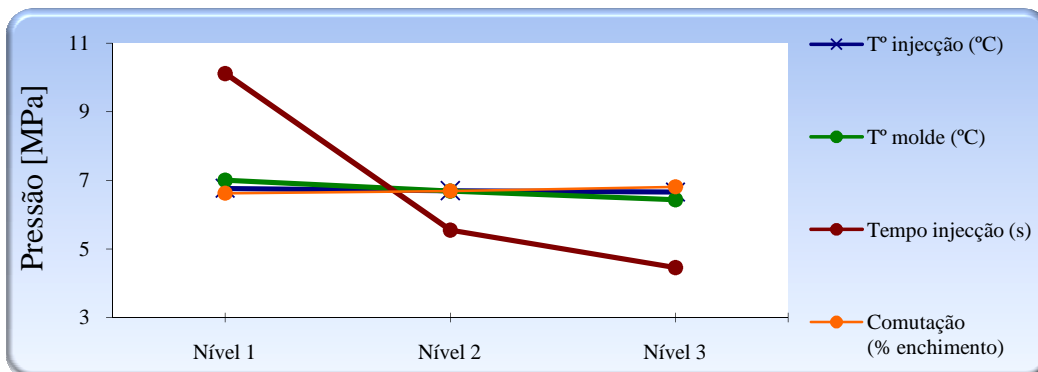


Figura 4.6: Gráfica linear para variação de pressão em PP (estudo comparativo)

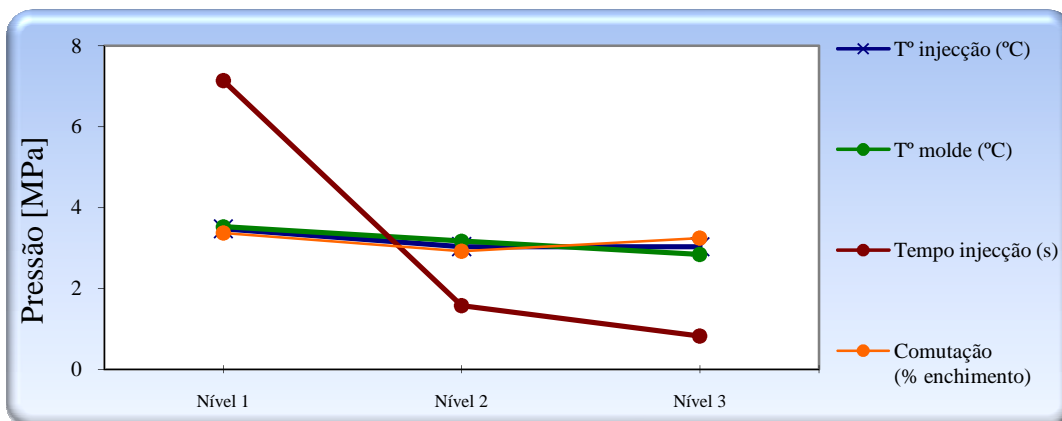


Figura 4.7: Gráfica linear para variação de pressão em PA (estudo comparativo)

A análise das gráficas lineares anteriores demonstra não só que o tempo de injeção é o parâmetro mais importante, mas também que este tem uma tendência bem definida, isto é, à medida que o nível avança a pressão diminui. A temperatura do molde também apresenta esta tendência, contudo de forma mais discreta. A temperatura de injeção e o ponto de

comutação não só têm uma variação diminuta, como esta não revela um comportamento linear. Depois de verificados os parâmetros mais importantes procede-se ao cálculo da previsão. Esta é determinada através da equação 4.1.

$$\bar{\mu} = \bar{T} + \sum_{i=1}^i (Fav_i - \bar{T}) \quad (4.1)$$

Em que $\bar{\mu}$ é o valor da previsão, \bar{T} a soma das médias e Fav_i os valores de pressão obtidos para os parâmetros importantes.

O conjunto de níveis de menor valor de pressão, para cada parâmetro, presentes nas tabelas anteriores denomina-se como combinação favorável. É espectável que os valores das previsões se aproximem dos valores obtidos nas análises com os parâmetros favoráveis. Se esta situação não se verificar significa que há problemas no estudo. No caso desta dissertação os erros poderiam ser vários: erros na simulação; erros do *software*; erros na elaboração da matriz ou erros na formulação do problema.

A Tabela 4.11 apresenta para cada material os valores de previsão calculados e os resultados exibidos nas Figuras 4.8 à 4.10. Verifica-se que, à excepção da PA, a variação entre ambos é reduzida. Assim, pode-se concluir que, de um ponto de vista teórico, esta análise é perfeitamente válida.

Tabela 4.11: Combinação favorável, previsão e resultados (estudo comparativo)

	Combinação favorável	Previsão	Resultados
POM	A2B3C3D1	6.913	6.895
PP	A3B3C3D1	4.184	4.173
PA	A3B3C3D1	0.481	0.740

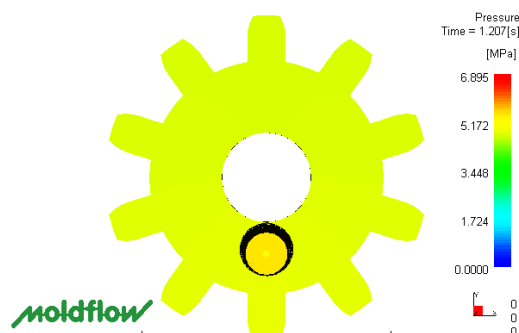


Figura 4.8: Pressão de injeção com a combinação favorável em POM (estudo comparativo)

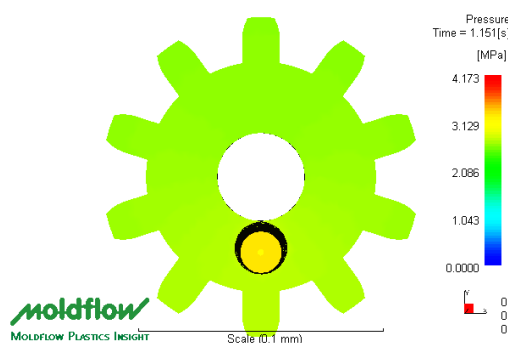


Figura 4.9: Pressão de injeção com a combinação favorável em PP (estudo comparativo)

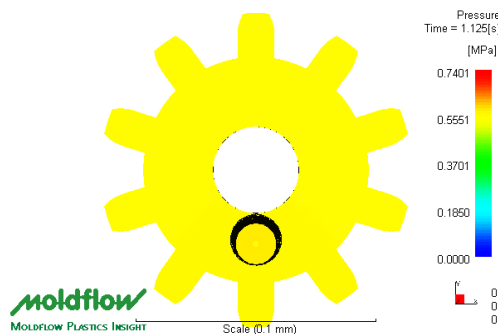


Figura 4.10: Pressão de injeção com a combinação favorável em PA (estudo comparativo)

O artigo de referência para este estudo apresenta resultados diferentes. Shen *et al* (2004) conclui que a temperatura do molde é o parâmetro mais importante, remetendo o tempo de injeção para um plano secundário. É possível que esta diferença se deva ao material, uma vez que o artigo não menciona a referência de cada material. Apesar destas diferenças, a tendência para cada parâmetro é comum a ambos os estudos.

4.2 Estudo computacional

Após a elaboração do estudo comparativo, optou-se por modelar e simular o enchimento de uma micro peça. Este estudo segue a metodologia utilizada no estudo anterior.

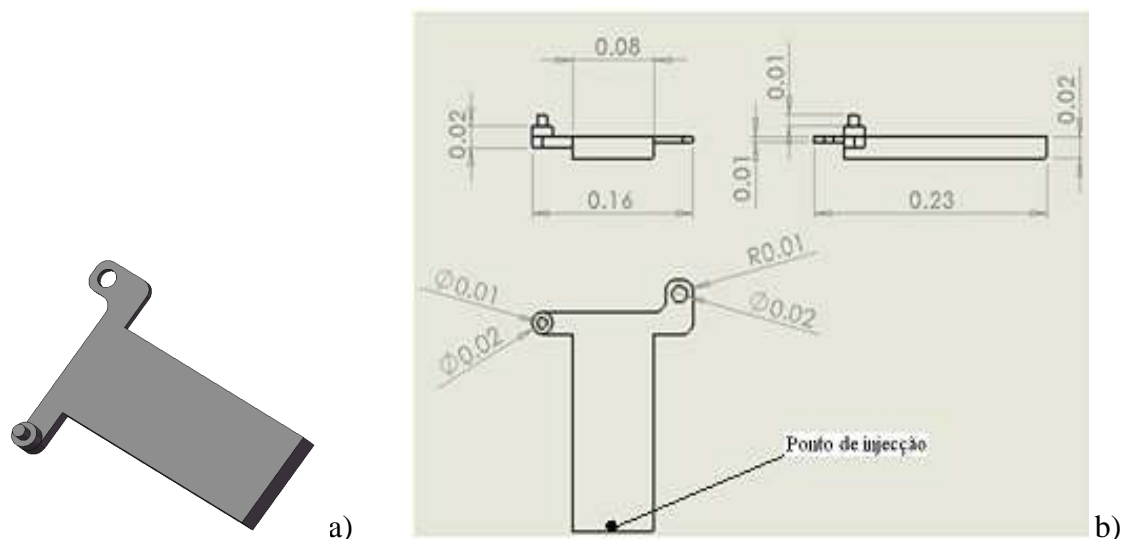


Figura 4.11: a) vista 3D da peça; b) dimensões da peça utilizada no estudo computacional

Mantendo os mesmos materiais, os valores de alguns parâmetros são alterados, uma vez que na perspectiva do autor alguns deles devem ser superiores aos utilizados no estudo anterior, nomeadamente, a temperatura de injeção e a temperatura do molde.

Do ponto de vista do estudo computacional, o que diferencia esta peça da anterior consiste na sua assimetria e nos seus micro detalhes. Na Figura 4.11, é visível uma zona de forma cilíndrica com 10 micrómetros tanto de diâmetro como de altura e uma região de união de material porque que o ponto de injeção se situa na zona oposta.

As três tabelas seguintes apresentam as matrizes de Taguchi. Verifica-se que, à excepção da PA, estes resultados são semelhantes aos do estudo anterior. Nesta fase, este facto é particularmente importante, uma vez que a geometria da peça é diferente da anterior.

Tabela 4.12: Matriz de Taguchi com os resultados para POM (estudo computacional)

POM					
Experiência Nº	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. de injecção (MPa)
1	180	160	0.1	99	23.67
2	180	165	0.6	99.5	18.15
3	180	170	1.1	99.9	17.94
4	200	160	0.6	99.9	25.76
5	200	165	1.1	99	9.769
6	200	170	0.1	99.5	29.83
7	220	160	1.1	99.5	15.24
8	220	165	0.1	99.9	40.8
9	220	170	0.6	99	10.92
				\bar{T}	21.342

Tabela 4.13: Matriz de Taguchi com os resultados para PP (estudo computacional)

PP					
Experiência Nº	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. de injecção (MPa)
1	220	160	0.1	99	12.78
2	220	170	0.6	99.5	9.207
3	220	180	1.1	99.9	8.097
4	240	160	0.6	99.9	13.48
5	240	170	1.1	99	5.398
6	240	180	0.1	99.5	14.97
7	260	160	1.1	99.5	8.818
8	260	170	0.1	99.9	19.67
9	260	180	0.6	99	5.882
				\bar{T}	10.922

Tabela 4.14: Matriz de Taguchi com os resultados para PA (estudo computacional)

PA					
Experiência Nº	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. de injecção (MPa)
1	310	280	0.1	99	29,47
2	310	290	0.6	99.5	10,04
3	310	300	1.1	99.9	8,632
4	330	280	0.6	99.9	18,36
5	330	290	1.1	99	6,234
6	330	300	0.1	99.5	22,23
7	350	280	1.1	99.5	9,925
8	350	290	0.1	99.9	35,86
9	350	300	0.6	99	6,145
				\bar{T}	16.211

As tabelas seguintes mostram a média de cada parâmetro para cada nível. À semelhança do estudo anterior, parâmetros que apresentam maior valor de diferença são os mais importantes.

Tabela 4.15: Média de cada nível por parâmetro para POM (estudo computacional)

POM				
	Tº injecção (°C)	Tº molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	19.920	21.557	31.433	14.786
Nível 2	21.786	22.906	28.237	21.073
Nível 3	22.320	19.563	14.316	28.167
Diferença	-1.866	-1.993	-17.117	-13.380

Tabela 4.16: Média de cada nível por parâmetro para PP (estudo computacional)

PP				
	T° injeção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injeção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	10.028	11.693	15.807	8.020
Nível 2	11.283	11.425	9.523	10.998
Nível 3	11.457	9.650	7.438	13.749
Diferença	-1.429	-2.043	-8.369	-5.729

Tabela 4.17: Média de cada nível por parâmetro para PA (estudo computacional)

PA				
	T° injeção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injeção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	16,047	19,585	29,520	13,950
Nível 2	16,275	17,378	11,848	14,398
Nível 3	17,310	12,669	8,264	21,284
Diferença	-1,263	-6,916	-21,256	-7,334

Analisando as tabelas anteriores, verifica-se que o tempo de injeção continua a ser o parâmetro que mais se destaca, contudo, a temperatura do molde e o ponto de comutação apresentam uma importância superior à registada no estudo anterior.

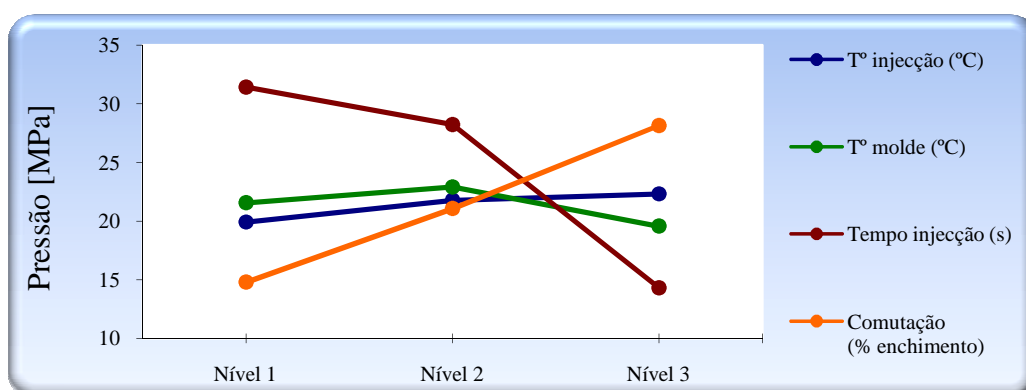


Figura 4.12: Gráfica linear para variação de pressão em POM (estudo computacional)

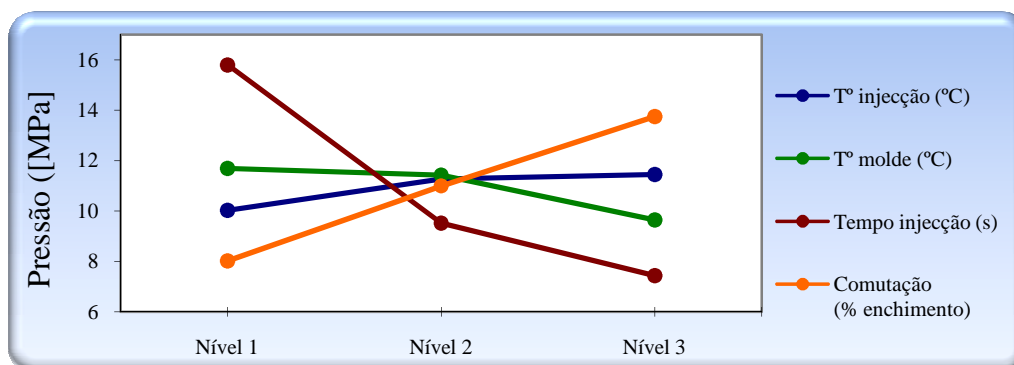


Figura 4.13: Gráfica linear para variação de pressão em PP (estudo computacional)

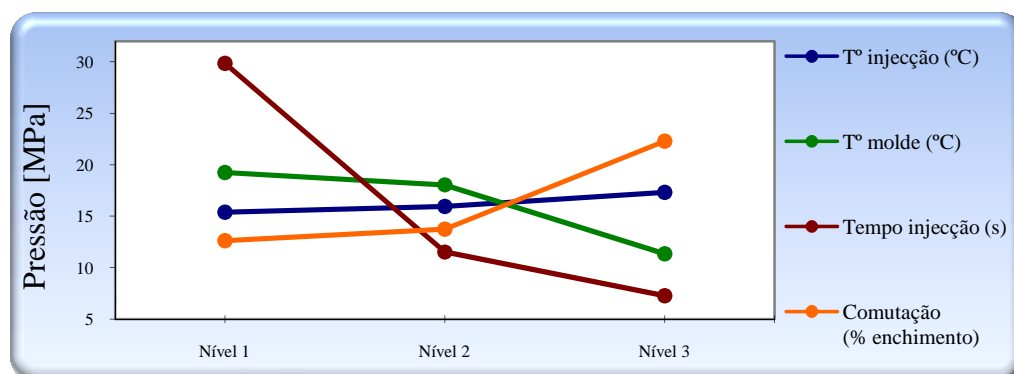


Figura 4.14: Gráfica linear para variação de pressão em PA (estudo computacional)

Através da equação 4.1 é calculada a previsão de resultados para as condições mais favoráveis. A Tabela 4.18 mostra os valores da previsão e os resultados obtidos para POM, PP e PA. Verifica-se que a diferença entre o previsto e o obtido não é significativa. A visualização gráfica destes resultados apresenta-se nas Figura 4.15, 4.16 e Figura 4.17.

Tabela 4.18: Combinação favorável, previsão e resultados para POM, PP e PA (estudo computacional)

Combinação favorável		Previsão	Resultado
POM	A1B3C3D1	7,761	8.43
PP	A1B3C3D1	3,262	4.83
PA	A1B3C3D1	1,794	2.57

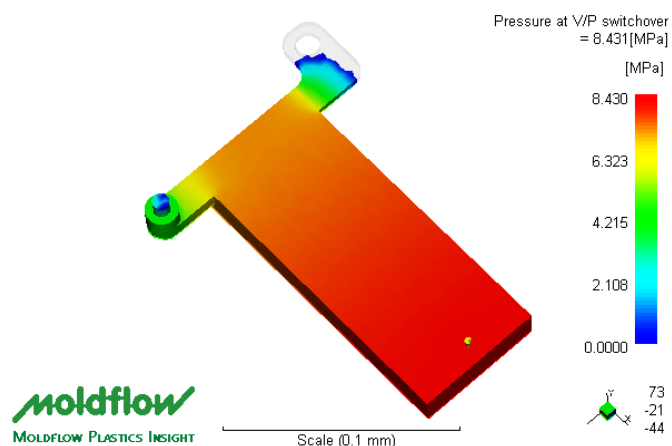


Figura 4.15: Pressão para a combinação favorável em POM (estudo computacional)

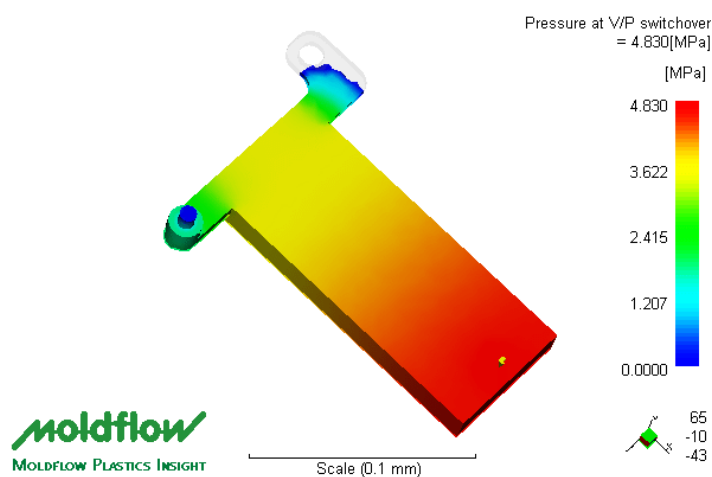


Figura 4.16: Pressão para a combinação favorável em POM (estudo computacional)

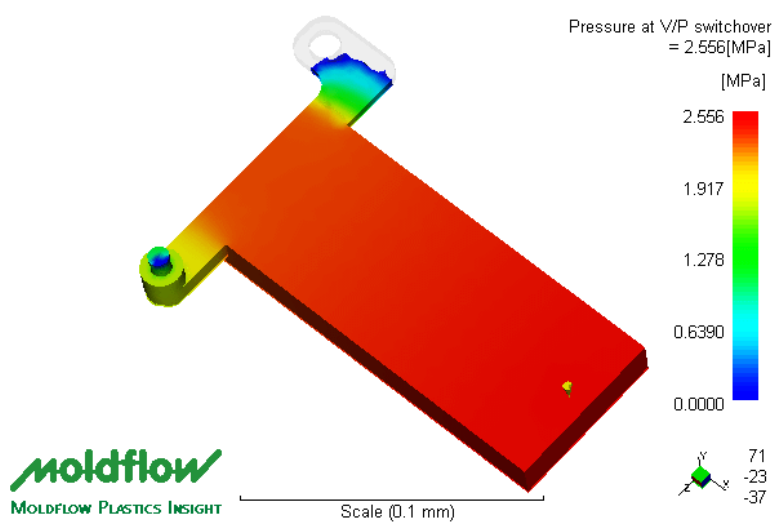


Figura 4.17: Pressão para a combinação favorável em POM (estudo computacional)

Os materiais utilizados nos estudos anteriores são semi-cristalinos. Para aumentar a abrangência do estudo desenvolvido nesta dissertação é importante analisar o comportamento de materiais amorfos. Assim, o estudo seguinte utiliza o Policarbonato (PC). As características deste material podem ser consultadas na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 Características do PC utilizado no estudo computacional

Fabricante	Teijin Chemicals
Nome comercial	Panlite AD-5503
Estrutura	Amorfo
Máx T° serviço	360
T° injecção recomendada	300-340
T° molde recomendada	100-130
T° extracção recomendada	130

Toda a metodologia deste estudo é análoga à dos estudos anteriores. A Tabela 4.20 e a Tabela 4.21 apresentam, respectivamente, a matriz de Taguchi e os valores médios de cada nível por parâmetro.

Tabela 4.20: Matriz de Taguchi com os resultados para PC (estudo computacional)

PC					
Experiência Nº	T° injecção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)	Pressão máx. de injecção (MPa)
1	310	240	0.1	99	30.89
2	310	250	0.6	99.5	14.85
3	310	260	1.1	99.9	12.22
4	330	240	0.6	99.9	26.2
5	330	250	1.1	99	8.202
6	330	260	0.1	99.5	28.48
7	330	240	1.1	99.5	13.75
8	330	250	0.1	99.9	45.75
9	330	260	0.6	99	9.198
				\bar{T}	21.060

Tabela 4.21: Média de cada nível por parâmetro para PC (estudo computacional)

Pressão				
	T° injeção (°C)	T° molde (°C)	Tempo injecção (s)	Comutação (% enchimento)
Nível 1	19.320	23.613	35.040	16.097
Nível 2	20.961	22.934	28.933	19.027
Nível 3	22.899	16.633	11.391	28.057
Diferença	-3.579	-6.981	-23.649	-11.960

A gráfica linear para a variação de pressão é visível na Figura 4.18 e a visualização gráfica está patente na Figura 4.19.

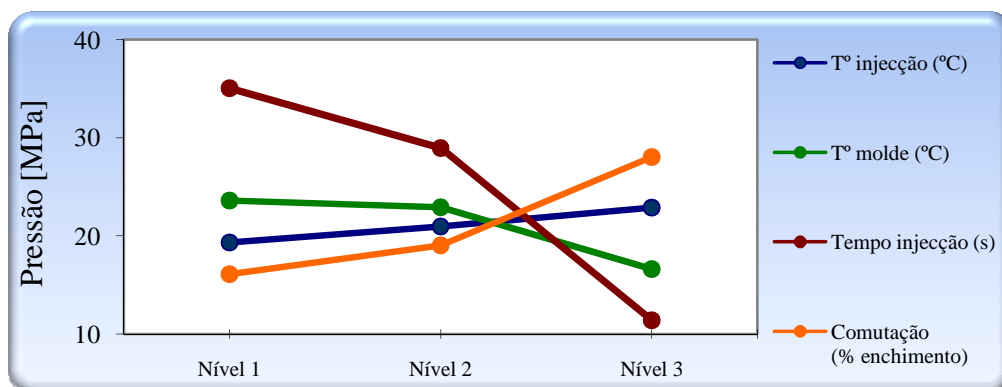


Figura 4.18: Gráfica linear para variação de pressão em PC (estudo computacional)

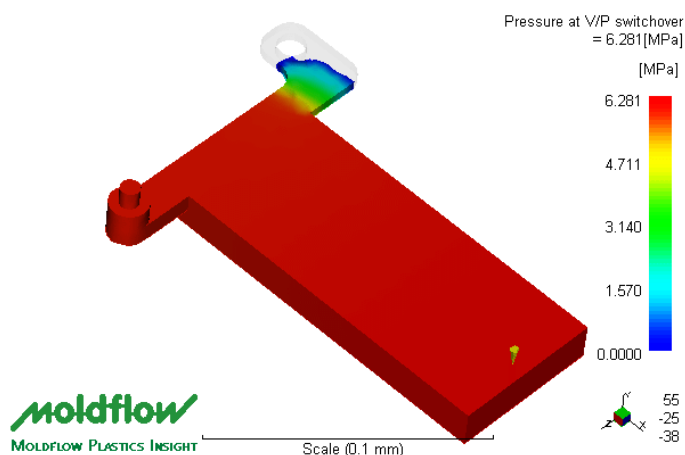


Figura 4.19: Pressão para a combinação favorável em PC (estudo computacional)

Tabela 4.22: Combinação favorável, previsão e resultados para PC (estudo computacional)

Combinação favorável	Previsão	Resultado
A1B3C3D1	6.427	6.281

Em todos os estudos verifica-se que o parâmetro mais importante para a pressão de injecção é o tempo de injecção. Assim, é importante verificar a variação da pressão com o tempo. As seguintes análises utilizam os materiais utilizados anteriormente. Os parâmetros de entrada são, à excepção da variável tempo, os valores mais favoráveis (Tabela 4.23).

Tabela 4.23: Valores fixos de entrada

	T° injecção (°C)	T° molde (°C)	Comutação (% enchimento)
POM	180	170	99
PP	220	180	99
PA	310	300	99
PC	310	260	99

A Tabela 4.24 mostra os valores de pressão obtidos.

Tabela 4.24: Valores de pressão obtidos

		POM	PP	PA	PC
Tempo de injecção	0.1	22.53	10.33	12.96	17.35
	0.3	18.45	7.288	6.019	10.35
	0.5	11.65	6.241	4.765	9.54
	0.7	9.983	5.509	3.717	5.693
	0.9	8.789	5.034	2.734	5.126
	1.1	8.431	4.83	2.556	4.457
	1.3	7.506	4.464	2.517	3.458
	1.5	6.557	4.253	1.647	2.803
	1.7	6.347	4.026	1.508	2.363
	1.9	5.675	3.914	1.385	2.246

A Figura 4.20 apresenta o gráfico que relaciona a variação da pressão com o tempo de injecção para cada material.

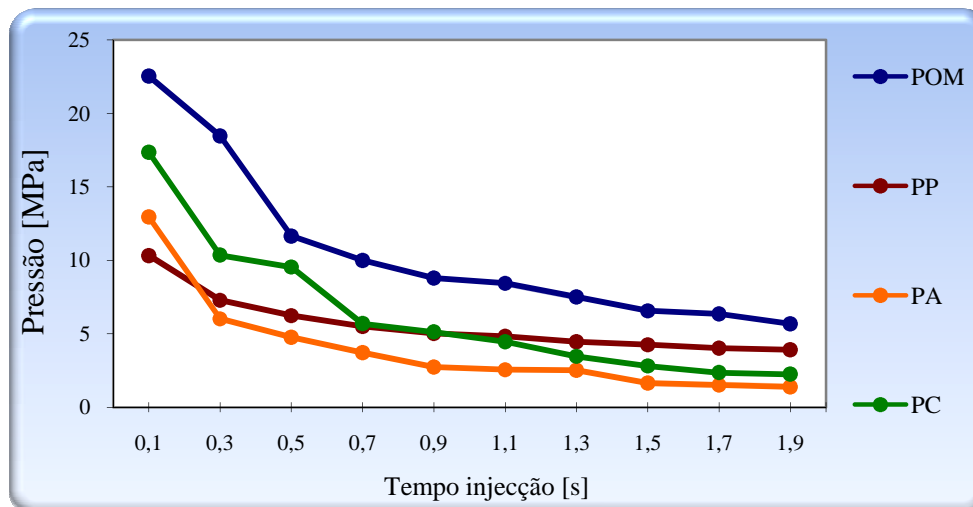


Figura 4.20: Relação tempo de injeção Vs pressão

Apesar de o tempo de injeção assumir, segundo estes estudos, o factor mais importante para a pressão, há um parâmetro que se mostrou preponderante para a micro injeção, uma vez que os seus valores neste processo são muito diferentes do processo convencional – a temperatura do molde. Como já referido anteriormente, a temperatura do molde deve ser superior à temperatura de transição vítrea para materiais amorfos e superior à temperatura de fusão para materiais semi-cristalinos.

A análise seguinte procura verificar, para cada material, qual a temperatura de molde mínima possível, isto é, qual a temperatura mínima para a qual a cavidade é totalmente preenchida. A temperatura de injeção, tempo de injeção e ponto de comutação assumem os valores favoráveis determinados anteriormente. A Tabela 4.25 apresenta os valores mínimos para temperatura de molde. Para valores abaixo dos descritos, o *software* transmite uma mensagem de que a pressão requerida é superior à possível.

Tabela 4.25: Valores mínimos para temperatura de molde

	POM	PP	PA	PC
Temperatura mínima de molde (°C)	155	150	250	230

O software *Plastics Insight*® resolve as simulações recorrendo a 4 modelos matemáticos:

- Modelo de *Stokes* simplificado: este é o modelo mais utilizado, pois, além de ser o modelo pré-definido tem o tempo de análise mais reduzido;
- Modelo de *Stokes*: este modelo utiliza as equações de pressão, movimento e energia apresentadas no capítulo anterior. O aumento do tempo de análise é cerca de 100%;
- Modelo de *Navier-Stokes*: este modelo é semelhante ao anterior, contudo este considera o efeito da inércia do fluxo. Comparativamente ao modelo de Stokes, o aumento de tempo de análise é cerca de 80%;
- Modelo de *Navier-Stokes* com efeito de gravidade: ao introduzir-se o efeito da gravidade do fundido obtém-se este modelo. Isto incrementa o tempo de análise em cerca de 50%.

Apresentados estes modelos, é importante verificar a relevância de cada um nos resultados computacionais obtidos. Deste modo, para cada modelo são elaborados estudos análogos aos apresentados na Figura 4.20. O modelo de *Navier-stokes* com efeito de gravidade não é alvo de estudo, uma vez que esta, devido às reduzidas massas envolvidas no processo, tem com toda a certeza uma importância praticamente nula no escoamento em micro canais.

A Figura 4.21 apresenta a pressão necessária dada pelos modelos em estudo. Para melhor visualizar a real diferença entre os modelos, a Figura 4.22 mostra, em percentagem, a variação da pressão obtida dos modelos *Stokes* simplificado e *Navier-Stokes* para o modelo de *Stokes*.

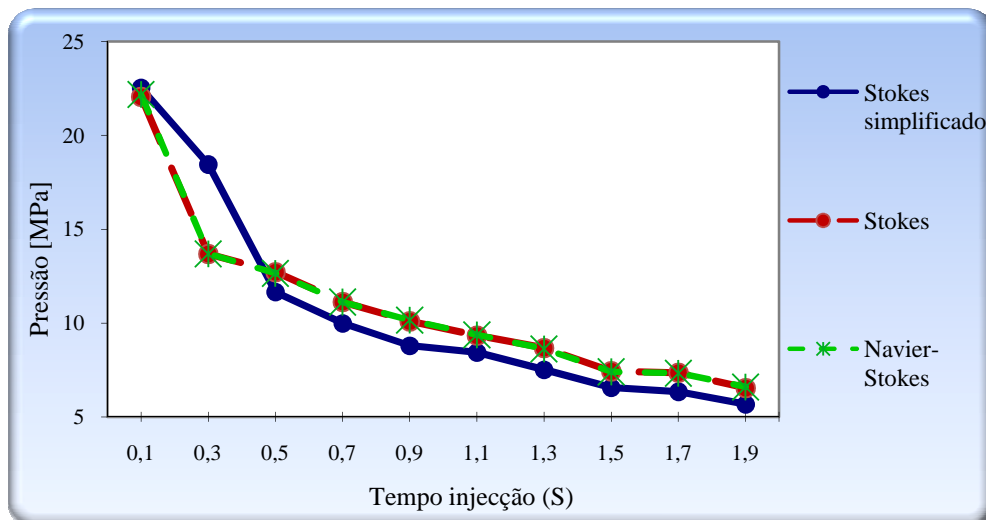


Figura 4.21: Pressão obtida em cada modelo

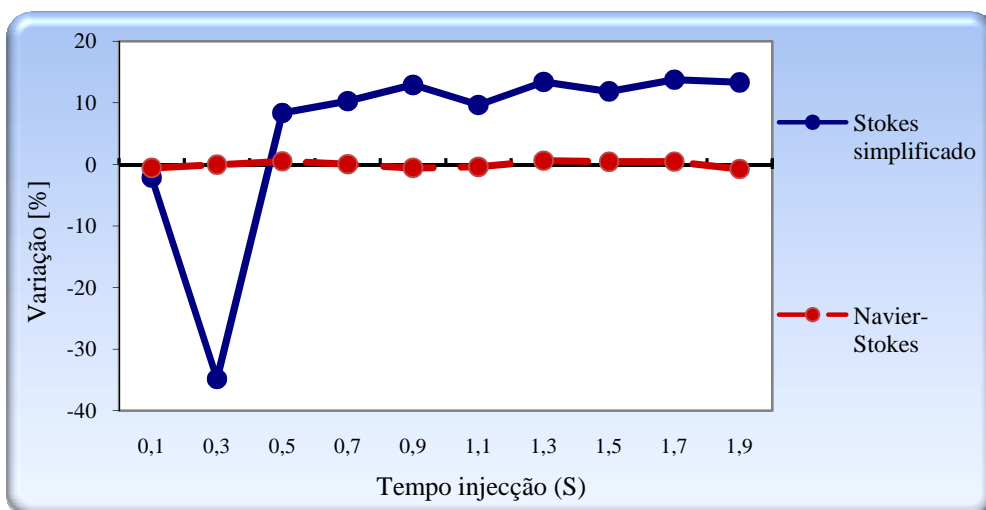


Figura 4.22: Variação da pressão obtida dos modelos *Stokes* simplificado e *Navier-Stokes* para o modelo de *Stokes*

Analisando a Figura 4.21 verifica-se, em primeira análise, que, independentemente dos valores, o comportamento para todos os casos é comum. O modelo de *Stokes* simplificado apresenta algum desvio dos outros modelos. Este facto é mais visível na Figura 4.22, pois entre o modelo de *Stokes* simplificado e o de *Stokes* verificam-se valores de variação de pressão entre 10% e 35% e, por sua vez, entre o modelo de *Stokes* e o de *Navier-Stokes* os valores situam-se abaixo de uma unidade percentual. Conclui-se então que na micro injeção a inércia do fundido tem uma importância praticamente nula.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas desta dissertação e os trabalhos que poderão ser importantes no futuro.

5.1 Conclusões

As micro tecnologias como disciplinas tecnológicas têm vindo a sofrer enormes desenvolvimentos. Os processos descritos nos capítulos 2 e 3 demonstram a forma como se tem evoluído nesta matéria. Cada passo alcançado pelos investigadores desses processos permite cada vez mais aumentar as capacidades e potencialidades de cada processo. A evolução deve-se não só à tecnologia desenvolvida, mas também a uma enorme evolução a nível dos equipamentos e dos materiais utilizados.

Os resultados obtidos no capítulo 4 vêm comprovar alguns conhecimentos teóricos que foram sendo descritos no capítulo 3. Verifica-se que os parâmetros envolvidos na micro injecção e na injecção convencional têm o mesmo efeito mas em proporções diferentes, isto é, a tendência mantém-se mas varia a dimensão do impacto.

O primeiro conjunto de estudos baseia-se, como já referido anteriormente, nos estudos desenvolvidos por Shen *et al* (2004). Apesar dos objectivos do estudo serem distintos, a elaboração das simulações foi importante para este trabalho, uma vez que serviu como base de apoio no desenvolvimento de todo o conjunto de análises.

Verifica-se que, de forma geral, os resultados obtidos no estudo comparativo são análogos aos obtidos no estudo computacional, o que reforça ainda mais as conclusões a seguir mencionadas.

As combinações favoráveis no estudo computacional seguem a tendência 1331 (temperatura de injecção e ponto de comutação a nível 1, enquanto temperatura do molde e tempo de injecção a nível 3). No estudo comparativo, a tendência para minimizar a pressão é nível 3 para temperatura do molde e tempo de injecção, nível 1 para ponto de comutação e nível 2 e 3 para temperatura de injecção. Tão importante como a tendência de cada parâmetro é a sua importância, que pode ser constatada nas tabelas de médias e nas figuras

das gráficas lineares. Constata-se então, em todas as análises de pressão, que o parâmetro mais importante é o tempo de injecção. De seguida, mas com menor importância, fica a temperatura do molde e em alguns casos o ponto de comutação. A temperatura de injecção revela-se sempre como um parâmetro de significado mínimo.

No capítulo 3 refere-se que a temperatura de injecção deve rondar a temperatura máxima permitida pelo material. Aparentemente este raciocínio faz todo o sentido, uma vez que maiores temperaturas implicam viscosidades inferiores, o que facilita a fase de injecção. Esta ideia é válida no processo de injecção convencional, contudo, através das análises do capítulo 4, verifica-se que a temperatura de injecção tem muito pouca influência na pressão de injecção. Este fenómeno, no ponto de vista do autor, deve-se ao facto de a quantidade de material a injectar ser muito reduzida, o que leva a que a sua inércia térmica seja praticamente nula. Desta forma, assim que o material entra na cavidade alcança imediatamente as temperaturas das paredes do molde, por maior que seja a temperatura de injecção. Conclui-se então que a temperatura do molde é um parâmetro muito importante para o processo, o que vai de encontro aos resultados obtidos.

No processo convencional, durante a injecção, o material vai solidificando e atingindo as temperaturas das paredes camada a camada. Devido às reduzidas espessuras das micro peças a noção de camada torna-se difícil de entender.

A introdução de tempos de injecção mais curtos implica, logicamente, velocidades de injecção e consequentes taxas de corte superiores. Sendo a pressão de injecção a pressão exigida ao fundido para empurrar o ar para fora da cavidade, velocidades superiores levam a que esta pressão seja superior. Esta relação também é válida para a injecção convencional, portanto conclui-se que a relação entre velocidade e pressão requerida mantém a mesma tendência para a micro injecção e para a injecção convencional. A Figura 4.20 ilustra este raciocínio e nela se observa que as curvas de relação apresentam a mesma tendência para os quatro materiais.

A introdução da simulação em PC permite concluir que a importância dos parâmetros de injecção para materiais amorfos é análoga aos parâmetros para materiais semi-cristalinos.

Um dado bastante importante a retirar das análises efectuadas é a determinação das temperaturas mínimas do molde, uma vez que ao se concluir que o tempo de injecção é um parâmetro muito mais importante que a temperatura do molde, pode-se induzir no erro que a micro injecção pode ocorrer com temperaturas de molde baixas se o tempo de injecção for suficientemente elevado, o que é de todo falso. A Tabela 4.25 apresenta os valores mínimos de temperatura de molde, isto é, para valores abaixo dos apresentados não é possível injectar a peça. Este dado torna a temperatura de molde um factor tão ou mais importante que o tempo de injecção, não obstante o facto de a temperatura de molde ter uma importância reduzida a partir de um determinado patamar.

Na fase final do capítulo 4 é apresentado um estudo que analisa a variação dos resultados obtidos em cada modelo utilizado. Verifica-se que os resultados obtidos no modelo de *Stokes* são muito semelhantes aos obtidos no modelo de *Navier-Stokes*, apenas com diferenças a rondar as décimas de pontos percentuais. Por outro lado, as diferenças para o modelo de *Stokes* simplificado são significativas. Conclui-se então que o modelo de *Stokes* é o mais adequado para o estudo, apenas com o inconveniente de se aumentar o tempo de análise relativamente ao método simplificado.

Apesar de haver algumas diferenças nos resultados obtidos para cada modelo constata-se que a tendência é análoga aos mesmos, deste modo, as conclusões retiradas do modelo simplificado são perfeitamente válidas.

5.2 Trabalhos futuros

Os estudos desenvolvidos nesta dissertação permitem chegar a conclusões muito importantes, contudo, o domínio da micro injecção de materiais poliméricos por parte do autor ainda tem um largo caminho a percorrer.

Segundo Chien *et al* (2005), o escoamento do fluxo na micro injecção apresenta algumas características próprias, sendo a mais importante o escorregamento do fundido sobre as paredes do molde (Figura 5.1). Posto isto, o próximo passo a ser dado deve seguir no aprofundamento do estudo do modelo matemático ligado à micro injecção, uma vez que o modelo utilizado nesta dissertação se focou nas equações que regem o processo convencional.

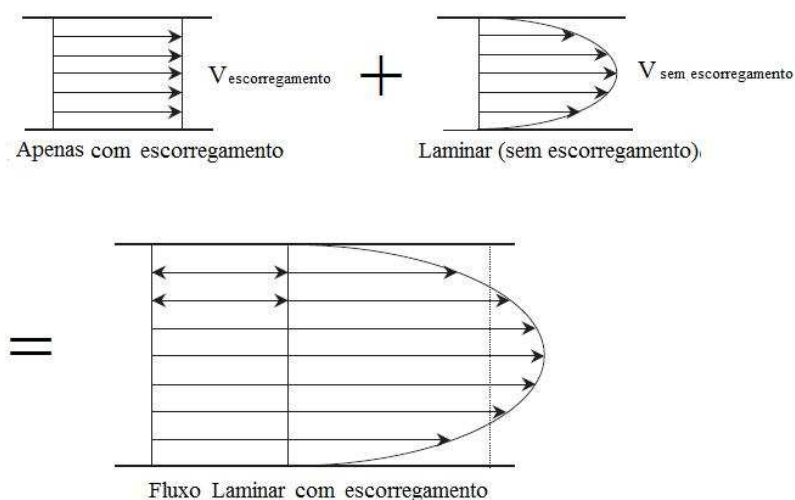


Figura 5.1: Esquema do escoamento com efeito de escorregamento (Chien *et al*, 2005)

Num futuro próximo, será importante executar as simulações deste estudo num *software* de simulação preparado para micro injecção porque esta versão do *Moldflow Plastics Insight®* não está preparada para este tipo de simulações.

Futuramente pretende-se comparar os resultados obtidos nesta dissertação com a micro injecção a nível físico. Para tal será necessário o projecto e a elaboração de um micro molde e aplicar na prática as simulações realizadas virtualmente.

REFERÊNCIAS

Almansa, A.; Wogerer C.; Rempp H.; Gebauer M.; IPMMAN Roadmap for Micro and Nanomanufacturing, Versão 2.0, 2006.

Arnold., J.; Combination of excimer laser micromachining and replication processes suited for large scale production, Applied Surface Science 86, p. 251-258, 1995.

Bado, P.; Clark, W.; Said, A.; Introduction to Micromachining Handbook; acedido a 7-2-2008 em www.cmxr.com/Industrial/Handbook/Introduction.htm.

Bártolo, P.J.; Optical Approaches to Macroscopic and Microscopic Engineering; Tese de Doutoramento; Universidade de Reading; UK, 2001.

Becker, E. B.; Carey, G. F.; Oden, J. T.; Finite Elements - An Introduction; Prentice-Hall Vol.1, 1981.

Bertsch, A.; Jiguet, S.; Bernhard, P.; Renaud, P.; Microstereolithography: a Review, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.758, 2003.

Chang, J.H.; Yang, S.Y.; Development of rapid heating and uniformly pressing system for micro hot embossing; ANTEC 2004 Plastics: Annual Technical Conference, Vol. 1: Processing, 2004.

Chien, R., D.; Wen, R., R.; Shia, C., C.; Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect; Journal of Micromechanics and Microengineering, p. 1389–1396, 2005.

Comissão Europeia; Nanotecnologias – Inovações para o mundo de amanhã; Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, 2004, ISBN 92-894-8890-5.

Deckard, C., R.; Method and apparatus for producing parts by selective sintering; Patente Norte Americana nº 4 863 538, 1986.

Evans, B.; Mehalso R.; How Small is Small?: A Guide to the New Microfabrication Design and Process Techniques, 2001; acedido a 8/11/2007 em <http://www.devicelink.com/mddi/archive/01/11/001.html>.

Fudim, E.V.; Method and Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Photosolidification, US Patent 4 752 498, 1988 e 4 801 477, 1989.

Gaspar, J.; Estudo da cura e do comportamento reológico de sistemas poliméricos altamente reforçados em estereolitografia; Tese de Mestrado; Universidade do Minho, 2006.

Giboz, J.; Copponex, T.; Mélé, P.; Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review; p. 96-106, 2004.

Gornik, G.; Injection Moulding with Microstructured surfaces for Medical Applications, Mocromol symp.; p. 369, 2004.

Heckele, M.; Schomburg, W. K.; Review on micro molding of thermoplastic polymers, Journal of Micromechanics and Microengineering, 14, R1-R14, 2004.

Hornes, J.; Göttert, J.; Lian, K.; Desta, Y.; Jian, L.; Materials for LIGA and LIGA-based microsystems; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 199, p. 332-341, 2003.

Ikuta, K., Hirowatari, K., real Three Dimension Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Molding, Proceedings of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, p. 42-47, 1993.

Institut Silicatiforschung; ORMOCER®e: Anorganisch-organische Hybridpolymere (Marke der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. München), 2003; acedido a 20-09-2007 em http://www.isc.fraunhofer.com /alteseiten/ormocere/index_o0.html.

Jardini, A.L.; Maciel, R.; Scarparo, M., A.; Andrade, S., R.; Moura, L., F.; The Development in Infrared Stereolithography Using Thermosensitive Polymers, Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, p. 273-277, 2003.

Kennedy, P.; Flow Analysis of Injection Molds; Hanser/Gardner Publications, 1995.

Kou, H.; Asif, A.; Shi, W.; Jiang, Z.; Huang, W.; A novel hyperbranched polyester acrylate used for microfabrications; *Polymers for Advanced Technologies* 15, p. 192-196, 2004.

Kukla C.; Loibi H.; Petter H.; Hannenbeim W.; *Kunststoffe Plast; Europe* 6, p. 1331, 1998.

Laser Zentrum Hannover©; Two-photon polymerization (2PP) technique; acedido a 12-09-2007 em http://www.laser-zentrum-hannover.de/en/fields_of_work/material_processing/nanotechnology/2pp.php.

Lasertec Pfronten GmbH; Grupo Gildemeister AG; 3DRemoval and Fine-Cutting via Laser – The LASERTEC Series; 2003; Publicação técnica.

Macosko, C., W.; *Rheology Principles, Measurements, and Applications*; ISBN-10: 0-471-18575-2, 1993.

Martin, M., T.; Whiteside, B.; Coates, P., D.; Allan, P., S.; Greenway, G.; Hornsby, P.; *Micromoulding: Considerations of Processing Effects on Medical Materials*; *Proceedings of ANTEC 2003 - 61st Annual Technical Conference & Exhibition*, p. 2582-2586, 2003.

Matias, J., M.; *Simulação e Optimização de Processos Estereolitográficos*; Tese de Mestrado; Universidade de Aveiro; Portugal, 2007.

Menz W.; Fillon B.; Dimov S.; Elsevier; 4M Network of Excellence in Multi-Material Micro Manufacture, A roadmapping study in Multi-Material Micro Manufacture, 2006.

Micro resist technology© products; acedido a 24-09-2007 em <http://www.microresist.de/product.htm>.

Munnik, F.; Benninger, F.; Mikhailov, S.; Bertsch, A.; Renaud, P.; Lorenz, H.; Gmür, M.; High aspect ratio, 3D structuring of photoresist materials by ion beam LIGA; *Microelectronic Engineering*, p. 67-68, p. 96-103, 2003.

Nasrullah, J.; *Chemistry of photoresist materials and photolithographic processes – Recent developments*, 2004.

Ostendorf, A.; Chichkov B.N.; Lazer Zentrum Hannover eV; Two-Photon Polymerization: A New Approach to Micromachining, p. 1-6, 2006.

Petsch, T.; Regenfuß, P.; Ebert, R.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, T.; Exner, H.; “Industrial laser micro sintering”; Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2004.

Pfleging, W.; Bernauer, W.; Hanemann, T.; Torge, M.; Rapid fabrication of microcomponents – UV Laser assisted prototyping, laser micromachining of mold inserts and replication via photomolding; Microsystem Technologies 9, p. 67-74, 2002.

Piotter, V.; Bauer, W.; Benzler, T.; Emde, A.; Injection molding of components for Microsystems; Microsystem Technologies 7, p. 99-102, 2001.

Piotter, V.; Guber, A. E.; Hecke, M.; Gerlach, A.; Micro Moulding of Medical Device Components; Business Briefing: Medical Device Manufacturing & Technology, 2004.

Piotter, V.; Hanemann, T.; Ruprecht, R.; Haußelt, J.; Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures; Microsystem Technologies, p. 129-133, 1997.

Regenfuß, P.; Ebert, R.; Exner, H.; Laser Micro Sintering: A versatile instrument for the generation of microparts; Laser Journal 1, p. 24-31, 2007.

Regenfuß, P.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Ebert, R.; Brabant, T.; Petsch, T.; Exner, H.; Industrial freeform generation of microtools by laser micro sintering; Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, p. 709-719, 2004.

Sha, B.; Dimov, S.; Griffiths, C.; Packianather, M., S.; micro injection moulding: factors affecting the replication quality of micro features, 2006.

Shen, Y., K.; Shie, Y., J.; Wu, W., J.; extension method and numerical simulation of micro injection molding, Lung Hwa University and technology, 2004.

Shi, Y.; Li, Z.; Sun, H.; Huang, S.; Zeng, F.; Development of a polymer alloy of polystyrene (PS) and polyamide (PA) for building functional part based on selective laser sintering; Proc. Instn Mech. Engrs, Part L, 218, p. 299-306, 2004.

Vasco, J.; André, N.; Bártolo, P.; Microfabrication: State-of-the-art; Virtual Modelling and Rapid Manufacturing – Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping; ISBN 0415390621, p. 483-490, 2005.

Vasco, J.; A Micro-Fabricação aplicada ao processo de Micro-Injecção; Tese de mestrado; Universidade do Minho; Guimarães, 2006.

Wicht, H.; Bouchaud, J.; NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III 2005 – 2009, 2005.

Worgull, M.; Héту, J., F.; Kabanemi, K., K.; Hecke, M.; Modeling and optimization of the hot embossing process for micro and nanocomponent fabrication; Microsystem Technologies, 12, p. 947-952, 2006.

Xue, Y.; Gu, P.; A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems, Computer-Aided Design, 28, p. 307-318, 1996.

Zhang, X.; Jiang, X., N.; Sun, C.; Micro-stereolithography for MEMS”, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) ASME 66, p. 3-9, 1998.

Zissi, S.; Bertsch, A.; Jézéquel, J., Y.; Corbel, S.; André, J., C.; Loughnot, D., J.; Stereophotolithography and Microtechnologies; Microsystem Technologies, Vol.2, No.2, p. 97-102, 1996.